O Boletim de Conjuntura (BOCA) publica ensaios, artigos de revisão, artigos teóricos e empíricos, resenhas e vídeos relacionados às temáticas de políticas públicas.

O periódico tem como escopo a publicação de trabalhos inéditos e originais, nacionais ou internacionais que versem sobre Políticas Públicas, resultantes de pesquisas científicas e reflexões teóricas e empíricas.

Esta revista oferece acesso livre imediato ao seu conteúdo, seguindo o princípio de que disponibilizar gratuitamente o conhecimento científico ao público proporciona maior democratizacão mundial do conhecimento.



BOLETIM DE CONJUNTURA

BOCA

Ano VII | Volume 24 | Nº 71 | Boa Vista | 2025

http://www.ioles.com.br/boca

ISSN: 2675-1488

https://doi.org/10.5281/zenodo.17793917

BOLETIM DE CONJUNTURA

www.ioles.com.br/boca

COMÉRCIO DE ÁGUA VIRTUAL NO SETOR SUCROENERGÉTICO DO PARANÁ: ANÁLISE DAS POLÍTICAS PÚBLICAS E GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS[1]

Anderson Ribeiro de Almeida[2]

Antônio Gonçalves de Oliveira[3]

José Francisco dos Reis Neto[4]

Resumo

O comércio de água virtual constitui uma dimensão estratégica da sustentabilidade hídrica, especialmente em cadeias produtivas intensivas em recursos naturais. Este estudo analisa o comércio de água virtual no setor sucroenergético do Paraná, suas implicações ecológicas e econômicas e sua articulação com políticas públicas estaduais de gestão da água. Empregou-se o método de insumo-produto, com a matriz estadual de 2015 redimensionada e coeficientes hídricos, aplicando-se a matriz inversa de Leontief para estimar exportações e importações virtuais a partir de dados secundários oficiais. Os resultados indicam superávit de 1,57 milhão de m³, com predominância do açúcar, revelando um déficit ecológico associado à transferência de água incorporada. O estudo evidencia o papel da governança hídrica e de instrumentos como o Programa de Segurança Hídrica e o indicador ODS 6.4.1 para fortalecer a sustentabilidade do setor.

Palavras-chave: Água Virtual; Governança Hídrica; Pegada Hídrica; Planejamento e Políticas Públicas; Sustentabilidade.

Abstract

Virtual water trade constitutes a strategic dimension of water sustainability, particularly in resource-intensive production chains. This study analyzes virtual water trade in Paraná's sugar-energy sector, examining its ecological and economic implications and its alignment with state-level water governance policies. The input–output method was employed using the 2015 Paraná regional matrix, redimensioned and coupled with water consumption coefficients, and the Leontief inverse matrix was applied to estimate virtual water exports and imports based on official secondary data. Results indicate a surplus of 1.57 million m³, driven mainly by sugar production, revealing an ecological deficit associated with the external transfer of embedded water. The study highlights the relevance of water governance and instruments such as the State Water Security Program and the application of SDG indicator 6.4.1 to strengthen the sustainability of the sugar-energy sector.

Keywords: Planning and Public Policy; Sustainability; Virtual Water; Water Footprint; Water Governance.

[1] O presente trabalho contou com o apoio institucional da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e do Instituto Federal do Paraná (IFPR).

[2] Professor do Instituto Federal do Paraná (IFPR). Doutor em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional pela Universidade Anhanguera (UNIDERP). E-mail: anderson.almeida@ifpr.edu.br

[3] Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Doutor em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). E-mail: agoliveira@utfpr.edu.br

[4] Professor da Universidade Anhanguera (UNIDERP). Doutor em Economia pela Universidad de Salamanca. E-mail: jose.rneto@uniderp.com.br

INTRODUÇÃO

A água é um recurso essencial para a produção agrícola e industrial, sendo a agricultura irrigada a maior consumidora global. A competição por água entre diferentes setores econômicos tem levado a uma reavaliação sobre seu uso na agricultura. O conflito entre a demanda por água na agricultura e o desenvolvimento econômico é amplamente discutido na literatura, especialmente devido à transferência de água incorporada em *commodities* via comércio interestadual e internacional. A cana-de-açúcar, objeto deste estudo, representa uma parcela significativa da produção agrícola mundial, por exemplo, requer uma quantidade substancial de água para seu cultivo.

Globalmente, a agricultura utiliza uma quantidade massiva de água, especialmente quando se consideram as perdas por irrigação. A indústria também é uma grande consumidora de água, especialmente na produção de alimentos e bens de consumo. Estudos recentes destacam que a agricultura irrigada e a produção industrial, especialmente de alimentos e bens de consumo, consomem volumes elevados de água, exacerbando a competição entre setores econômicos.

Em média, 209 m³ de água para produzir uma tonelada de cana-de-açúcar em todo o mundo, um volume considerado alto. No Brasil, entorno de 748,9 mil hectares de área plantada necessitam de sistemas de irrigação, isto evidencia a amplitude do consumo de água na produção de cana-de-açúcar e ressalta a importância de estratégias de gestão eficiente dos recursos hídricos.

O presente estudo está diretamente relacionado à necessidade de integrar a gestão dos recursos hídricos às atividades econômicas, especialmente em setores intensivos em água, como o sucroenergético. Considerando que o Paraná é um exportador líquido de água virtual, conceito que expressa o volume de água incorporado às diferentes etapas da cadeia produtiva de um bem ou serviço, desde sua origem até a finalização, e que posteriormente é comercializado para outras regiões, e que o estado também enfrenta importantes desafios ecológicos, a pesquisa ressalta a relevância de políticas públicas que contemplem não apenas a distribuição dos recursos hídricos, mas também a promoção do uso sustentável e eficiente da água.

A análise do comércio de água virtual, incluindo as exportações de açúcar e etanol, fornece uma base importante para uma governança mais estratégica, que envolva a colaboração entre governo, setor privado e sociedade. Além disso, a adoção de tecnologias mais eficientes e práticas agrícolas sustentáveis, tornam-se fatores essenciais para aprimorar a governança da água, equilibrando os interesses econômicos com a preservação dos recursos hídricos.

Não obstante os efeitos econômicos e a intensidade da água virtual exportada pelas relações comerciais interestaduais e internacionais do Paraná, este trabalho parte da seguinte questão norteadora:

Considerando os resultados dessas operações, em que medida o comércio de água virtual no setor sucroenergético do Paraná gera implicações ecológicas e econômicas, e como essas implicações se articulam com as políticas públicas de gestão dos recursos hídricos no estado?

Para respondê-la, este artigo tem como objetivo geral: Analisar o comércio de água virtual no setor sucroenergético do estado do Paraná, com atenção às suas implicações ecológicas e econômicas e à sua articulação com as políticas públicas de gestão dos recursos hídricos.

De forma a alcançar esse objetivo e responder à questão proposta, definem-se os seguintes objetivos específicos: (i) Calcular o saldo líquido do comércio de água virtual do setor sucroenergético no estado do Paraná; (ii) Verificar se o complexo sucroenergético paranaense é importador ou exportador líquido de água virtual; (iii) Analisar os impactos ambientais e econômicos associados ao saldo do comércio de água virtual no setor; (iv) Examinar as políticas públicas estaduais voltadas à gestão e governança da água, com destaque para os instrumentos normativos e programas de segurança hídrica; e (v) Avaliar a implementação do indicador ODS 6.4.1 nas ações do Estado.

Quanto à metodologia, adota-se a matriz de insumo-produto com abordagem analítica utilizada para estudar a interdependência entre os diferentes setores de uma economia. Ela permite entender como mudanças na demanda de um setor afetam outros setores, além de identificar os setores mais importantes. A matriz de insumo-produto é usada para calcular diversos indicadores, como o efeito multiplicador, que mostra o impacto de uma mudança na demanda final sobre a produção total da economia. Também é utilizada para calcular o volume do comércio de água virtual do setor sucroenergético do Paraná, indicando o volume de água incorporado aos produtos comercializados por esse setor.

Para esclarecer esses pontos, o artigo é organizado em diferentes seções. Começa com esta introdução que oferece uma visão geral do tema, seguida de uma base teórica que detalha a governança da água, os aspectos da água virtual, tanto na perspectiva de consumo quanto de comércio, abordando a pegada hídrica da cana-de-açúcar e os aspectos do comércio interestadual e internacional do setor sucroenergético. A seção subsequente descreve os métodos e materiais utilizados na pesquisa, explicando como os dados foram coletados, selecionados e analisados. Posteriormente, a seção de resultados destaca as principais descobertas dos estudos revisados. A análise desses resultados é explorada na penúltima seção, seguida das conclusões, evidenciadas nas considerações finais, juntamente com suas reflexões, limitações encontradas e propostas para futuras investigações.

GOVERNANÇA DA ÁGUA

A água é um recurso essencial para a produção agrícola e industrial, sendo a agricultura irrigada a maior consumidora global. A competição por água entre diferentes setores econômicos tem levado a uma reavaliação sobre seu uso na agricultura. O conflito entre a demanda por água na agricultura e o desenvolvimento econômico é amplamente discutido na literatura, especialmente devido à transferência de água incorporada em *commodities* via comércio internacional. A cana-de-açúcar, que representa uma parcela significativa da produção agrícola mundial, requer uma quantidade substancial de água para seu cultivo (SILVA *et al*., 2011).

A segurança hídrica é um conceito que vem sendo discutido a mais de duas décadas, sendo definido como a capacidade de uma população de garantir acesso contínuo à água potável, além da capacidade de garantir a produção mínima de alimentos localmente para permitir a sobrevivência da população em tempos de crise, quando a importação de alimentos se torna inviável. O uso doméstico de água representa uma pequena parte das necessidades humanas em comparação com a agricultura, que representa grande parcela do consumo de água de forma consuntiva. A segurança hídrica está diretamente conectada à segurança alimentar e ao nexo água-alimento-energia-clima-comércio. Apesar da distribuição desigual de recursos hídricos no mundo, a segurança hídrica global é viabilizada pelos fluxos de água virtual incorporados no comércio de *commodities* agroalimentares. Porém, a literatura carece de uma análise mais aprofundada sobre o papel dos "gestores virtuais da água" no sistema global de comércio agroalimentar (SOJAMOA *et al*., 2012; MARSILY, 2019).

A análise de *network* transforma o princípio da participação em algo mais concreto ao mostrar como diferentes atores se conectam na governança da água. Por meio desse mapeamento, é possível identificar quem ocupa posições estratégicas, entender as relações entre os subgrupos e avaliar o nível de integração entre os setores públicos. Isso favorece uma gestão mais colaborativa e eficiente. Ao destacar as características estruturais dos sistemas sociais, essa abordagem ajuda a descrever arranjos multissetoriais de governança, onde a participação se traduz em redes colaborativas. Nelas, organizações se conectam compartilhando informações, recursos ou projetos, permitindo uma visão mais clara tanto do papel de cada participante, quanto do desempenho global do setor hídrico (MAYA-JARIEGO, 2014).

Indicadores de centralidade individual ajudam a entender como o poder se distribui na governança hídrica. De forma geral, as agências governamentais têm um papel central, concentrando a maior parte das decisões no setor público por meio de estruturas hierárquicas. Por outro lado, outros atores, como as organizações agrícolas, muitas vezes acabam ocupando posições secundárias, mesmo representando uma grande demanda por água. O mesmo acontece em áreas rurais isoladas, que, muitas vezes, estão

desconectadas dos espaços institucionais onde as decisões são tomadas (FLIERVOET *et al*., 2016; KHARANAGH *et al*., 2020; NABIAFJADI *et al*., 2021; GATT, 2016; DELGADO *et al*., 2021).

Vos e Hinojosa (2016) argumentam que a governança da água deve englobar a proteção ativa das fontes hídricas locais, a promoção de uma distribuição equitativa e a implementação de medidas para mitigar os impactos negativos da exportação de água virtual em territórios vulneráveis. Nesse contexto, comunidades locais e suas organizações, em parceria com ONGs em diferentes níveis, podem estabelecer alianças para a preservação dos recursos hídricos. Além disso, as empresas devem ir além dos modelos padronizados de gestão da água, colaborando com comunidades, associações de produtores, usuários de água, sindicatos, ONGs ambientais, organizações de bacias hidrográficas e outros stakeholders para desenvolver e implementar medidas de proteção mais eficazes.

Marsily (2019) enfatiza a importância da governança da água, destacando a necessidade de participação ativa dos usuários na administração local dos recursos hídricos. No entanto, ele ressalta que a gestão compartilhada só é viável quando há um investimento sólido na educação e informação da população sobre as realidades hidrológicas e as diretrizes de gestão da água, aliado a um controle administrativo rigoroso. O autor conclui que a governança da água é um desafio complexo que exige equilíbrio entre o desenvolvimento econômico, a justiça social e a preservação ambiental. O futuro da água e, por consequência, o futuro das próximas gerações depende de como aprende-se a compartilhá-la e a preservá-la.

ASPECTOS TEÓRICOS DA ÁGUA VIRTUAL NA PERSPECTIVA DO CONSUMO E DO COMÉRCIO

Água virtual refere-se ao volume de água necessário para produzir um produto ou serviço em seu local de origem, considerando todos os insumos ao longo da cadeia de produção, que é então comercializado e transportado para outras regiões (ALLAN, 1993; HOEKSTRA; HUNG, 2002). A estratégia de comércio de água virtual permite que países com escassez de água importem produtos de regiões ricas em água, economizando seus próprios recursos hídricos (ALLAN, 1993; ALLAN, 2011). Este comércio melhora o acesso à água em áreas com escassez, refletindo o saldo comercial de importação e exportação de cada país, destacando a importância da rede de comércio de água virtual (DINESH KUMAR, 2018).

Inicialmente, o conceito foi introduzido como uma solução para a escassez de água no Oriente Médio, usando a importação de alimentos para reduzir a pressão sobre os recursos hídricos locais. Desde

o século XX, o volume do comércio global aumentou, expandindo, consequentemente, a troca de água virtual por meio de commodities (ALLAN, 1997; SHTULL-TRAURING; BERNSTEIN, 2018).

Desde as primeiras publicações sobre água virtual e pegada hídrica, observa-se um aumento significativo de estudos sobre o gerenciamento dos recursos hídricos sob aspectos econômicos, ambientais e sociais (NAVARRO-RAMÍREZ *et al*., 2020). Os conceitos de água virtual e pegada hídrica estão intimamente ligados; a diferença reside na perspectiva de análise. A metodologia da pegada hídrica foi introduzida por Hoekstra em 2002 na UNESCO-IHE e posteriormente desenvolvida na Universidade de Twente, Holanda. O conceito estabelece um indicador baseado no consumo de água que fornece informações além dos indicadores tradicionais do setor produtivo (HOEKSTRA; HUNG, 2002).

A pegada hídrica é diferenciada por três tipos: verde, azul e cinza. A pegada hídrica verde refere-se à água da chuva evaporada ou adicionada aos produtos durante o processo produtivo. A pegada hídrica azul relaciona-se às águas superficiais ou subterrâneas que evaporam ou são incorporadas ao produto, ou, ainda, aquelas que são devolvidas ao mar ou despejadas em outras bacias. Já a pegada hídrica cinza corresponde ao volume de água necessário para diluir a poluição gerada durante o processo produtivo industrial (HOEKSTRA; HUNG, 2002).

A pegada hídrica foi desenvolvida em analogia ao conceito de pegada ecológica, que quantifica a área necessária para sustentar a vida das pessoas. A pegada hídrica, por sua vez, indica o volume de água necessário para o sustento de uma população. O objetivo é avaliar a sustentabilidade da criação de um produto, além de quantificar a eficiência e a equidade do uso da água e identificar ações estratégicas para alcançar a sustentabilidade (HOEKSTRA, 2011). A água virtual, analisada tanto pela perspectiva de consumo quanto pelo comércio, revela que, nos países ricos, o maior consumo de bens e serviços resulta em pegadas hídricas mais altas (GERBENS-LEENES *et al*., 2012).

Pesquisas recentes têm avaliado a pegada hídrica na produção de cana-de-açúcar, focando na análise da eficiência do uso da água nos sistemas de irrigação. Estudos destacam a necessidade de desenvolver modelos matemáticos que incorporem estratégias de monitoramento baseadas em clima, solo e planta, para otimizar a irrigação (BWAMBALE *et al*., 2022). Além disso, a adoção de tecnologias inovadoras na cadeia produtiva da cana-de-açúcar contribui para uma maior sustentabilidade e aceitação dos produtos no mercado mundial. Bordonal *et al*. (2018) ressaltam avanços na eficiência do (re)uso da água e na redução da pegada hídrica na produção brasileira de cana-de-açúcar entre 1975 e 2015.

Joseph *et al*. (2020) examinam diferentes abordagens para quantificar o uso sustentável da água e a escassez de água em grande escala, propondo uma estrutura de modelagem que considere a disponibilidade de água associada à terra para melhorar as avaliações do uso sustentável da água. Essas pesquisas indicam uma diversidade de estratégias para reduzir o consumo de água na produção agrícola

irrigada e enfatizam a importância da sustentabilidade no uso da água. Estudos como o de Navarro-Ramírez *et al.* (2020) abordam indicadores de uso sustentável da água na indústria, buscando desenvolver modelos que considerem aspectos sociais, econômicos e ambientais.

O uso eficiente da água na produção agrícola e industrial é essencial para garantir a sustentabilidade dos recursos hídricos. A implementação de práticas e tecnologias inovadoras, aliada a políticas públicas eficientes, pode promover a sustentabilidade e a eficiência no uso da água, assegurando o desenvolvimento econômico sem comprometer o meio ambiente. As pesquisas destacam a importância de estratégias de gerenciamento que equilibrem a demanda econômica com a conservação dos recursos hídricos, apontando para a necessidade de uma abordagem integrada e sustentável no uso da água.

Na perspectiva do comércio, a literatura considera que importar água virtual é uma maneira eficaz de aliviar a escassez (TIAN *et al*., 2018; HADDAD *et al*., 2018; ZHANG *et al*., 2019; FU *et al*. 2021), já que esse problema é uma questão importante que restringe o desenvolvimento sustentável da economia e da sociedade global (GAO *et al.,* 2020). Na literatura, são apresentados diferentes métodos para descrever e avaliar quantitativamente a água virtual. Além das duas perspectivas mencionadas, a água virtual pode ser amplamente dividida em abordagens de pegada hídrica volumétrica e orientada para o impacto. Por exemplo, Silva *et al.* (2015) investigaram a variação do uso de água no cultivo da cana-de-açúcar pelo método tradicional, utilizando o balanço hídrico do solo em condições de campo.

Hassan *et al.* (2017) afirmam que a água virtual incorporada ao comércio internacional é equivalente a quase um terço da água aplicada diretamente em todo mundo. Isso reforça o papel significativo que o comércio desempenha na redistribuição dos recursos hídricos em nível global. No entanto, a eficiência na distribuição ocorrerá caso o comércio de produtos industriais promova o fluxo de água virtual de regiões com altos níveis de disponibilidade hídrica para regiões com escassez.

Por outro lado, Chen *et al*. (2018) analisam o tema pela ótica dos exportadores líquidos de água virtual, os quais sofrem com falta de recursos hídricos. Segundo os pesquisadores, as diferentes economias devem ajustar a estrutura de comércio internacional para aliviar os efeitos do agravamento da falta de água. Por isso, sugerem às economias produtoras (a exemplo da Indústria de Serviços) que substituam, em proporções, as exportações de produtos hidrointensivos por outros com baixo consumo de água, evitando o paradoxo econômico. Em acréscimo, os autores destacam que as regiões devem fazer um pleno uso do efeito de economia de água da importação.

Os efeitos econômicos e os efeitos da intensidade da água virtual são os impulsionadores mais significativos dos fluxos de água virtual. A diferença é que o efeito econômico impulsiona positivamente os fluxos de água virtual, mas o efeito de intensidade influencia negativamente (FU *et al.,* 2021).

Fu *et al.* (2021) afirmam que a aplicação ineficiente de recursos hídricos se tornou um problema urgente que restringe o desenvolvimento sustentável do mundo. Em decorrência disso, apresentam o comércio de água virtual como alternativa para melhorar a eficiência da utilização dos recursos hídricos.

De acordo com a teoria de Heckscher-Ohlin, são as dotações de recursos naturais que devem determinar a especialização de uma área na produção de produtos e serviços específicos, pois, se isso não ocorrer, os seus requisitos devem ser importados de outras regiões. No entanto, estudos sobre o comércio de água virtual concluíram que essa comercialização não está correlacionada à disponibilidade de recursos hídricos e que a água virtual flui de regiões com escassez de água para regiões com abundância de água (VERMA *et al*., 2009; ZHANG *et al.,* 2016).

Para se avaliar os fluxos de recursos naturais, como é o caso da água como objeto deste estudo (HASSAN *et al*., 2017; AVISO *et al*., 2018; CHEN *et al*. 2018; TIAN *et al.,* 2020; LIU *et al.,* 2019; ZHANG *et al*. 2019; DENG; LIU, 2021; WANG *et al*., 2020; ZAREI; NASROLLAHI, 2020; ZHAO *et al*., 2020; DENG *et al*. 2021; SOARES *et al*., 2021); da terra (GUO; SHEN, 2015); ou da energia (LIN, 2019), tem-se utilizado o modelo de insumo-produto como uma abordagem de cima para baixo. Isso é de grande interesse especialmente em regiões áridas com altos níveis de escassez de água. Os resultados são fundamentais para se criar políticas públicas, com o devido planejamento e gestão dos recursos hídricos, adequadas para alcançar o desenvolvimento econômico com um uso eficiente e sustentável de seus recursos.

O comércio virtual de água entre regiões reflete uma vantagem comparativa na eficiência do uso desse recurso, com regiões exportadoras geralmente necessitando de menos água do que regiões importadoras. No entanto, essa troca desigual é influenciada pela distribuição desigual da disponibilidade hídrica global e pela variação sazonal dos períodos chuvosos. Estudos recentes sobre o comércio de água virtual, utilizando metodologias como o modelo regional ou multirregional de entrada e saída, destacam a predominância de pesquisas na China e em países asiáticos. Essas pesquisas analisam o volume e os fluxos de água virtual, demonstrando a complexidade e o impacto dessa dinâmica no cenário global (ALMEIDA; REIS NETO, 2022).

Análises quantitativas revelam a predominância dos setores primários no consumo direto de água, haja vista a pecuária e a silvicultura exercerem forte influência nos fluxos de água virtual. Países como o Quirguistão e a Malásia dependem da importação líquida de água virtual, com o trigo e produtos agrícolas sendo as principais fontes. O comércio de água virtual apresenta taxas de crescimento notáveis, especialmente nas importações da China, impulsionadas pelo setor alimentício. Os Estados Unidos emergem como o maior importador de água virtual, enquanto a Índia lidera as exportações. A África do Sul enfrenta um crescimento mais lento nas importações, enquanto a Rússia registra uma taxa significativa

de exportação. Regiões como o Mediterrâneo e o Reino Unido também são importantes no comércio de água virtual, refletindo complexidades econômicas e de sustentabilidade (ALMEIDA; REIS NETO, 2022).

Na perspectiva do comércio interestadual nacional, estudos específicos no Ceará, Mato Grosso do Sul e Paraná abordaram o consumo de água virtual pelos setores econômicos e o saldo do comércio de água virtual. No Ceará, embora a agropecuária seja reconhecida por seu alto consumo de água, não foi identificada como um setor-chave em termos de fluxos hídricos. O Mato Grosso do Sul destacou-se como exportador líquido de água virtual, com a soja em grão influenciando outros setores. Já no Paraná, o setor agropecuário foi identificado como o principal consumidor, enquanto o estado mostrou-se exportador líquido no comércio interestadual (ALMEIDA; REIS NETO, 2022).

Além disso, um estudo nacional realizado em janeiro de 2002 pelo IPEA mapeou o uso de água ao longo da cadeia de produção e os impactos da adoção de tecnologias menos intensivas em água. A utilização do modelo de insumo-produto foi comum entre esses estudos para calcular o volume de água virtual em diversos setores produtivos. Essas pesquisas apontam para a necessidade de políticas públicas mais eficientes para o uso dos recursos hídricos, especialmente em tempos de crise como a enfrentada pelo Paraná (ALMEIDA; REIS NETO, 2022).

METODOLOGIA

Os Modelos de Insumo-Produto (MIP), formulados por Wassily Leontief na década de 1940, constituem instrumentos fundamentais para compreender como os diferentes setores de uma economia se relacionam por meio do intercâmbio de bens e serviços. Esses modelos registram tanto os insumos utilizados pelas atividades produtivas quanto os bens destinados ao consumo final. As MIPs oferecem suporte relevante à tomada de decisão governamental ao permitir análises detalhadas da estrutura econômica. A abordagem proposta por Leontief evidencia o grau de interdependência entre as cadeias produtivas, convertendo suas interações em variáveis quantificáveis e aplicando princípios do equilíbrio geral aos estudos empíricos. Em termos operacionais, a análise de insumo-produto organiza esses fluxos em uma matriz que representa as transações econômicas: enquanto as linhas descrevem a oferta setorial, as colunas registram a demanda por insumos necessária ao funcionamento de cada setor (MILLER; BLAIR, 2009, GUILHOTO, 2011).

Aplicados ao estudo da água virtual, esses modelos tornam possível estimar o uso de água incorporado às atividades produtivas e rastrear sua circulação pela economia, ampliando a capacidade de avaliação de pressões hídricas e de impactos ambientais (ALMEIDA; REIS NETO, 2022, 2024). A

literatura recente tem demonstrado avanços metodológicos ao combinar o modelo de Leontief a diferentes estruturas analíticas. Estudos como o de Wu *et al*. (2022) utilizam MRIOs de alta resolução para analisar fluxos inter-regionais de recursos, evidenciando como diferentes configurações produtivas influenciam a circulação de insumos agrícolas. Em perspectiva complementar, Zhang *et al*. (2025) integram o insumo-produto à teoria da pegada hídrica cinza, permitindo mensurar a transferência de poluição hídrica virtual e identificar padrões regionais e setoriais de emissão indireta, expandindo a compreensão dos efeitos de propagação entre os setores.

Outros trabalhos avançam ao incorporar técnicas de redes complexas. Hao *et al*. (2025) associam a modelagem de insumo-produto à construção de redes *multilayer* para mapear fluxos de água virtual entre 313 cidades, identificando conexões-chave, centralidade e formações comunitárias. Wang *et al.* (2025) seguem abordagem semelhante, utilizando métricas de redes para caracterizar propriedades estruturais, como conectividade esparsa e comportamento "*small-world*", que influenciam a redistribuição territorial da água virtual.

Ainda, foram encontrados estudos que ampliam a dimensão analítica ao integrar modelagem hídrica, MRIO ambientalmente estendido e caminhos estruturais. Zheng *et al*. (2025) combinam essas ferramentas para rastrear trajetórias de estresse hídrico entre 309 cidades, revelando disparidades na transmissão de riscos e nas relações entre uso da água e geração de valor. Li *et al.* (2025) utilizam abordagem semelhante em regiões áridas, quantificando o transbordamento do risco de escassez hídrica e identificando os elos produtivos responsáveis por sua difusão.

Por fim, Shen *et al.* (2025) reforçam o papel do MRIO ao desenvolver um indicador específico, o índice VWTCI, para avaliar a capacidade do comércio doméstico de redistribuir água virtual e mitigar, ou intensificar, a escassez hídrica entre aglomerados urbanos. Em conjunto, esses estudos demonstram que a modelagem de insumo-produto, em suas distintas extensões e integrações, constitui o núcleo metodológico dominante nas análises de água virtual. A incorporação de redes, pegadas ambientais, trajetórias estruturais e indicadores específicos tem ampliado sua capacidade explicativa, permitindo caracterizar, com maior precisão, padrões espaciais, fluxos setoriais e dinâmicas de redistribuição hídrica no contexto econômico contemporâneo.

Em uma matriz de insumo-produto, como ilustrado no quadro 1, cada coluna representa os setores econômicos que demandam insumos, enquanto cada linha mostra o quanto cada setor fornece de insumos para os demais. Quando a água é considerada como insumo produtivo, é possível mapear como esse recurso é utilizado de forma direta e indireta pelas diferentes cadeias produtivas. Por exemplo, o setor agrícola consome grandes volumes de água para irrigação, mas também depende de insumos como fertilizantes e equipamentos, cuja fabricação também demanda água. De forma semelhante, o setor

industrial utiliza água em seus processos de transformação, o que se reflete em toda a cadeia produtiva. Assim, mesmo setores aparentemente distantes do uso direto da água podem contribuir para seu consumo total, o que evidencia a importância de compreender essas interações para promover a gestão eficiente dos recursos hídricos (GUILHOTO, 2011).

Quadro 1 - Modelo da Matriz de Leontief

		Produto		Setores		Demanda final	Exportações	Produção total
		1	2	1	2			
Produto	1			U_{ixj}		f_i		q_i
	2							
Setores	1	V_{jxi}				y_j	e_i	x_i
	2							
Valor adicionado				$v_j{}'$				
Importações				m_j				
Produção total		q'_j		X'_j				
Água				W_j				

Fonte: Elaboração própria. Adaptada de Guan e Hubacek (2007), Guilhoto (2009) e Miller e Blair (2009).

Considerando-se que existam n setores e m produtos na economia, tem-se que os elementos contidos no quadro são:

i e j representam, respectivamente, as linhas (insumos ou produtos) (i) e as colunas (indústrias ou setores) (j);
U_{ixj} = matriz de uso, que apresenta a quantidade de produto (i) requerido pelo setor (j);
V_{jxi} = matriz de produção, que apresenta o montante total de produto (j) produzido pelo setor (i);
f_i = ao vetor de demanda final, por setor;
y_j = vetor de demanda final, por produto;
e_i= vetor de exportações totais realizadas em cada setor;
q_i= q'_j = vetor de produção total, por produto;
x_i = X'_j = vetor de produção total, por setor;
$v_j{}'$ = vetor do total do valor adicionado à produção gerado em cada setor;
m_j = vetor de importações totais realizadas em cada setor;
W_j = uso de água doce no setor (j).

Como resultado da aplicação do modelo (quadro 1), é possível estimar a quantidade de água virtual envolvida nas transações comerciais realizadas pelo estado do Paraná, tanto no mercado interno quanto no externo. Neste estudo, foram considerados dois tipos de fluxos comerciais: comércio interestadual, que corresponde às trocas de bens e serviços entre o Paraná e os demais estados brasileiros; e comércio internacional, que envolve as transações do Paraná com outros países.

Para fins analíticos, adotam-se os termos "exportações" e "importações" para ambos os tipos de comércio, distinguindo-se, no entanto, sua abrangência territorial. As exportações interestaduais referem-se ao envio de bens e serviços do Paraná para outros estados do Brasil, enquanto as exportações internacionais indicam a saída de produtos paranaenses para o exterior. O mesmo critério se aplica às

importações. A soma total desses fluxos, interestaduais e internacionais, permite calcular o saldo líquido do comércio de água virtual no setor sucroenergético paranaense.

Assim, alguns pesquisadores propõem que se utilize o método insumo-produto para calcular o volume de comércio de água virtual de diversos setores da economia, pois pode ser dividido em um modelo de insumo-produto de região-setor único e um modelo de insumo-produto multirregional ou multisetorial, de acordo com o número de áreas de pesquisa.

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os passos adotados por esses dois modelos são basicamente os mesmos. No modelo de entrada-saída, os dados de uso de água de cada indústria, divididos pela produção total, são usados para obter o coeficiente de uso direto da água. Em seguida, o coeficiente de uso direto da água é multiplicado pela matriz inversa de Leontief (HASSAN *et al*., 2017; AVISO *et al*, 2018; CHEN *et al*., 2018; TIAN *et al*., 2018; HADDAD *et al*., 2018; LIU *et al*., 2019; ZHANG *et al*. 2019; DENG; LIU, 2021; WANG *et al*., 2020; ZAREI; NASROLLAHI, 2020; ZHAO *et al*., 2020; DENG *et al*. 2021; SOARES *et al*., 2021).

A água como insumo primário está envolvida em toda a cadeia produtiva de uma economia. Essa relação pode ser obtida por meio de um coeficiente de consumo de água doce para cada setor produtivo. O coeficiente de consumo direto de água doce é obtido por meio da razão da quantidade total de água consumida do setor (j) pelo total de entrada para esse setor (xj). Portanto, a unidade para o coeficiente de consumo de água doce é m^3/R$, ou seja, cada unidade monetária gasta pelo setor (j) corresponde a uma unidade de volume de água. Esse indicador representa os efeitos diretos ou de primeira rodada da interação setorial na economia (BOUHIA, 2001; HUBACEK; SUN, 2005; DENG; LIU, 2021; ZAREI; NASROLLAHI, 2020).

Nesse sentido, a exportação de água virtual EAV que satisfaz a demanda final dos consumidores estrangeiros, isto é, a quantidade de água que é exportada virtualmente no comércio interestadual ou internacional, é definida a partir da equação (1), a seguir, baseada em Zhao (2009) e Wang (2013):

$$EAV_{1xj} = (W_{1xj}\widehat{X'}_{jxj}^{-1})\hat{\epsilon}_{jxj} \qquad (1)$$

Em que:

EAV_{1xj}= exportação de água virtual para a demanda final do setor externo (j);
W_{1xj} = entrada de água doce do setor (j);
$\widehat{X'}_{jxj}^{-1}$ = produção total do setor (j).

$\delta_j = W_{1xj}\widehat{X'}^{-1}_{jxj}$ (consumo de água virtual) no setor (j).
$\hat{\sigma}_j$ = exportações do setor (j).

As importações de água virtual IAV correspondem, por sua vez, à água virtual importada para satisfazer a demanda final. No entanto, é necessário considerar aspectos de tecnologia empregados no processo produtivo quanto ao consumo de água dos países (regiões) importadores (WIEDMANN *et al*., 2007). As variações tecnológicas não podem ser analisadas com um único modelo de insumo-produto, em virtude da indisponibilidade de dados para os diversos países ou regiões de onde provêm as importações.

Diante disso, este estudo considerou a hipótese, amplamente aceita, de que o processo e a tecnologia de produção de um produto importado são similares aos produzidos internamente (MACHADO, 2002; ZHAO *et al*., 2009; ZHAO *et al*., 2010).

Nessa perspectiva, o consumo total de água (CTA) do produto importado é o mesmo do produzido internamente. De acordo com Zhao *et al*. (2009), o pressuposto é totalmente coerente com o conceito de água virtual importada definido por Renault (2003). Para os autores supracitados, a água virtual incorporada às importações não é a real, consumida no local de produção, mas a que o país teria consumido se tivesse de produzir o produto internamente. Por isso, o conceito de água virtual diz respeito à quantidade de água que é poupada importando-se um produto, em vez de produzi-lo internamente. A equação da importação de água virtual é expressa desta forma:

$$IAV_{1xj} = (W_{1xj}\widehat{X'}^{-1}_{jxj})\hat{\mu}_{jxj} \quad (2)$$

Em que:

IAV_{1xj}= importação de água virtual para a demanda final dos setores interno (j);
W_{1xj} = entrada de água doce do setor (j);
$\widehat{X'}^{-1}_{jxj}$ = produção total do setor (j).
$\delta_j = W_{1xj}\widehat{X'}^{-1}_{jxj}$ (consumo de água virtual) no setor (j);
$\hat{\mu}_j$ = importações do setor (j).

A balança comercial de água virtual (BCAV) de uma economia é calculada pela subtração das importações de água virtual das exportações de água virtual, com base na seguinte equação (ZHAO *et al*., 2009; WANG *et al*., 2013; GKATSIKOS; MATTAS, 2021):

$$BCAV = EAV - IAV \quad (3)$$

Se o saldo for positivo, então a economia é exportadora líquida de água virtual e o processo econômico consome recursos hídricos que não permanecem na área estudada, mas são exportados para fora dela. Caso o valor seja negativo, a economia é importadora líquida de água virtual e não esgota seus próprios estoques de água. No entanto, a economia local depende de recursos hídricos fora da área de estudo, o que a torna vulnerável a pressões externas (ZHAO, 2009; WANG, 2013; GKATSIKOS; MATTAS, 2021).

Dependendo da disponibilidade de água na área de estudo, o paradoxo da água de Leontief entra em vigor. Uma região com escassez de água deveria ser um importador líquido de água virtual natural, pois sustentaria seus baixos estoques, reduzindo a escassez de água e aumentando a sustentabilidade ambiental da economia. Por outro lado, uma área com abundância de água deve aproveitar sua disponibilidade de recursos hídricos e exportar produtos intensivos em água para áreas mais secas. Em ambos os casos, se as respectivas condições não forem atendidas, a área de estudo se enquadra no paradoxo de Leontief (GKATSIKOS; MATTAS, 2021).

Este estudo pautou-se na matriz insumo-produto referente ao estado do Paraná do ano de 2015, elaborada e publicada pelo IPARDES, composta por 42 setores. A partir dela, baseado em Leontief (1967), Morimoto (1970), Guilhoto (2011) e Mendes *et al*. (2011) autor realizou o redimensionamento para o complexo sucroenergético. A matriz consolidada ficou com os seguintes setores: (1) Cana-de-açúcar; (2) Açúcar; (3) Etanol.

Morimoto (1970), Guilhoto (2011) e Mendes *et al.* (2011) destacam que, ao se agregarem setores, há um viés de agregação, isto é, uma diferença entre o vetor de produção total do sistema agregado e o vetor obtido pela agregação do total da produção do sistema regional não agregado. Contudo, isso não inviabiliza o estudo, pois os efeitos da agregação somente se tornam relevantes quando há uma redução muito expressiva do número de setores da matriz original.

Levantamento dos dados

Os dados utilizados nesta pesquisa foram extraídos de bases consolidadas, como o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) - Contas Regionais (PAM e PAIC), o Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social (IPARDES), a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), a Relação Anual de Informações Sociais (RAIS), a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), a União da Indústria de Cana-de-açúcar (UNICA), o Sistema de Informação Geográfica do Agronegócio (SIGA), a Secretaria da Agricultura e do Abastecimento do Estado do Paraná (SEAB), o Escritório de Estatística (EAGRI) da Subsecretaria de Planejamento e Orçamento (SUPLAN),

o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), a Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR), a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) e a Fundação de Apoio à Universidade Federal de Viçosa (FUNARBE).

Os dados foram organizados conforme o estudo de Visentin e Szigethy (2022), que mapeou o uso da água ao longo da cadeia de produção no Brasil e estimou os impactos da adoção de tecnologias menos intensivas em água sobre a intensidade hídrica total e o uso de água. Foi utilizada a matriz insumo-produto do estado do Paraná referente ao ano de 2015, elaborada e publicada pelo IPARDES, composta por 42 setores. Baseando-se em Leontief (1967), Morimoto (1970), Guilhoto (2011) e Mendes *et al.* (2011). A referida matriz foi então ajustada para o complexo sucroenergético, resultando nos seguintes setores: (1) Cana-de-açúcar; (2) Açúcar; (3) Etanol.

Morimoto (1970), Guilhoto (2011) e Mendes *et al*. (2011) apontam que a agregação de setores pode introduzir um viés, ou seja, uma diferença entre o vetor de produção total do sistema agregado e o vetor obtido pela agregação do total da produção do sistema regional não agregado. No entanto, esse viés não compromete o estudo, pois seus efeitos só se tornam relevantes quando há uma redução expressiva no número de setores da matriz original. Além disso, foram utilizados dados de Almeida e Reis Neto (2024), dos quais foram extraídos os indicadores de consumo de água direto (CDA), indireto (CIA) e total (CTA) para o complexo sucroenergético do estado do Paraná, com base no ano de 2015, em hm3 / mil de unidades monetárias.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste estudo a água é o insumo debatido. Para examinar se o Paraná é um estado importador ou exportador de água virtual é preciso compreender quais setores consomem mais água em detrimento a outros e quais setores-chave têm maior influência em todo o processo de consumo de água.

Para tanto, foram considerados 03 (três) setores da economia do estado do Paraná, que compõem o complexo sucroenergético com base na matriz de insumo-produto do Ipardes. Essa matriz apresenta as relações entre os setores da economia ao registrar os fluxos de bens e serviços e demonstrar as relações intersetoriais dentro do sistema econômico de um país ou estado. Tal ferramenta pode ser utilizada para estimar o impacto sobre a produção, o emprego, a renda (GUILHOTO, 2011) e os impactos ambientais das atividades econômicas, de projetos governamentais, do setor privado sobre a economia local e nacional (CASTELAO *et al*., 2019).

A pegada hídrica do complexo sucroenergético paranaense está concentrada no consumo total de água pela produção da cana-de-açúcar. Na Tabela 01, são detalhados os indicadores de consumo de água

direto (CDA), indireto (CIA) e total (CTA) para os 3 setores do complexo sucroenergético do estado do Paraná, com base no ano de 2015, em hm^3/mil de unidades monetárias. Tais indicadores são úteis para avaliar a alocação eficiente dos recursos hídricos.

Para um desenvolvimento sustentável, é preciso sinergia entre economia, sociedade e meio ambiente de forma que, ao se buscar o crescimento econômico, sejam levadas em consideração a inclusão social e a proteção ambiental (ZANIBONI; SCHMIDT, 2014).

As importações e as exportações de água virtual aumentaram significativamente em todo o mundo, e isso se justifica, especialmente, pela melhoria das infraestruturas logísticas, o que ocasiona a redução dos custos de transporte e de armazenagem. O Paraná tem uma das maiores extensões de malha rodoviária do país, com aproximadamente 20.929,97 km de estradas pavimentadas, além de uma malha ferroviária composta por 2.400 km (PARANÁ, 2016).

Tabela 1 - Indicadores de consumo de água direto (CDA), indireto (CIA) e total (CTA) para o complexo sucroenergético do estado do Paraná, com base no ano de 2015, em hm^3 / mil de unidades monetárias

	Complexo sucroenergético	CDA	CIA	CTA
1	Cana-de-açúcar	391 954	9 971	401 925
2	Açúcar	407 968	2 285	410 253
3	Etanol	135 244	482	135 726

Fonte: Elaboração própria. Adaptada de Almeida e Reis Neto (2024).

De acordo com os dados apresentados na Tabela 02, o estado do Paraná apresentou um saldo positivo de 1,57 milhões m³ de água virtual, resultado da diferença entre as exportações totais (1.873.957 m³) e as importações totais (302.631 m³). Esse superávit evidencia que o complexo sucroenergético paranaense é, sob a ótica do comércio, exportador líquido de água virtual. Tal condição é fortemente influenciada pelo setor de açúcar, responsável por 79% das exportações totais e 85,58% do saldo líquido positivo. No comércio internacional, esse protagonismo é ainda mais acentuado, com o açúcar representando 99% das exportações de água virtual e praticamente a totalidade do saldo positivo.

Tais resultados também apontam que o setor apresentou um *déficit* ecológico no ano de 2015. No total, foram 1,8 milhões de m^3 de água virtual exportada que saíram do estado, impulsionados pelas exportações de produtos agropecuários, responsável por 87% de toda água virtual exportada. O resultado vai ao encontro do obtido por Zangisk e Carvalho (2021), os quais afirmam que os setores com maior requerimento de água são o da Agricultura, da Pecuária, da Produção Florestal, da Pesca e da Aquicultura, pois exportam para todas as regiões do país.

Tabela 2 - Comércio interestadual e internacional de água virtual, em m³ de água para o complexo sucroenergético do estado do Paraná no ano de 2015

	Complexo Sucroenergético	Comércio interestadual					
		Export. (EAV)	%	Import. (IAV)	%	Saldo (BCAV)	%
1	Cana-de-açúcar	11.422	2	4.704	1	6.718	0,2
2	Açúcar	286.091	42	130.874	44	155.218	40,8
3	Etanol	384.373	56	166.504	55	217.869	59
	Total	**681.886**	**-**	**302.082**	**-**	**379.805**	**-**
	Complexo Sucroenergético	Comércio internacional					
		Export. (EAV)	%	Import. (IAV)	%	Saldo (BCAV)	
1	Cana-de-açúcar	0	-	0	-	0	-
2	Açúcar	1190026	99	385	70	1.189.640	99,84
3	Etanol	2.045	1	164	30	1881	0,16
	Total	**1.192.071**	**-**	**549**	**-**	**1.191.522**	**-**
	Complexo Sucroenergético	Comércio Total					
		Export. (EAV)	%	Import. (IAV)	%	Saldo (BCAV)	
1	Cana-de-açúcar	11.422	1	4.704	2	6.718	0,42
2	Açúcar	1.476.117	79	131.259	44	1.344.858	85,58
3	Etanol	386.419	20	166.668	54	219.751	14
	Total	**1.873.957**	**-**	**302.631**	**-**	**1.571.326**	**-**

Fonte: Elaboração própria.

Conforme a literatura especializada, a importação de água virtual é considerada uma estratégia eficiente para mitigar a escassez hídrica, sobretudo em regiões onde a disponibilidade de água representa um obstáculo ao desenvolvimento sustentável (FU *et al*. 2021). No entanto, o estado do Paraná se destaca pela tendência oposta: configura-se como exportador líquido de água virtual, especialmente por meio do complexo sucroenergético, o que evidencia sua inserção nas dinâmicas globais de comercialização de produtos hidrointensivos.

Apesar dessa condição, o setor sucroenergético também apresenta fluxos de entrada de água virtual. As importações de produtos dessa cadeia produtiva contribuíram para o ingresso de aproximadamente 302,6 mil m³ de água virtual, sendo que 99% desse volume advém do comércio interestadual. É importante destacar que o cálculo da água virtual importada se baseia na suposição de que os produtos adquiridos de outras regiões possuem o mesmo Coeficiente Técnico de Água (CTA) daqueles produzidos no Paraná. No entanto, essa equivalência pode não se confirmar na prática, uma vez que a eficiência hídrica nos processos produtivos varia entre regiões e países. Assim, quanto maior for a eficiência do local de origem, ou seja, quanto menor o volume de água necessário para produzir os mesmos bens, menor será a quantidade de água virtual incorporada às importações. Nesse sentido, o conhecimento sobre a origem dos produtos é fundamental para mitigar essa limitação metodológica e aprimorar as estimativas.

O setor sucroenergético do Paraná é peça fundamental para a economia estadual, destacando-se pela produção e exportação de açúcar e etanol. Este setor não só gera empregos diretos e indiretos, mas também impulsiona indústrias associadas, como transporte, logística e comércio. A transformação da

cana-de-açúcar em produtos de maior valor agregado dentro do estado maximiza os ganhos econômicos, proporcionando um saldo positivo elevado que indica uma eficiência na produção de açúcar e etanol.

O etanol, por sua vez, apresenta participação expressiva no comércio interestadual, representando 56% das exportações de água virtual nessa esfera, mas com influência menos significativa no mercado internacional. A cana-de-açúcar *in natura*, embora seja a matéria-prima essencial da cadeia produtiva, tem papel marginal no comércio externo e reduzido impacto no comércio interestadual, o que reforça a ideia de que sua importância está concentrada no consumo hídrico local, e não na circulação comercial direta.

A diferença entre os saldos do comércio internacional (1.191.522 m³) e interestadual (379.805 m³) revela que o maior volume de água virtual exportada pelo setor sucroenergético do Paraná está associado à demanda externa, o que impõe desafios significativos à sustentabilidade dos recursos hídricos estaduais. Essa configuração caracteriza um típico *déficit* ecológico: embora o estado registre *superávit* econômico-comercial do setor sucroenergético revele uma contribuição significativa para a balança comercial estadual e nacional, esse desempenho econômico carrega consigo um custo ecológico relevante. A exportação de produtos hidrointensivos, como o açúcar e o etanol, implica na transferência indireta de grandes volumes de recursos hídricos, o que pode comprometer a disponibilidade local de água e pressionar ecossistemas já fragilizados.

Esse cenário evidencia um *trade-off* fundamental entre os ganhos econômicos derivados da inserção competitiva do Paraná no mercado global e os custos ambientais associados à sobrecarga dos sistemas hídricos regionais. Ignorar essa relação pode levar à intensificação da escassez hídrica e à perda da resiliência dos territórios produtores. Portanto, políticas públicas que busquem equilibrar os incentivos ao comércio com estratégias de conservação da água tornam-se indispensáveis para garantir a sustentabilidade de longo prazo do setor.

Essa realidade remete ao “Paradoxo de Leontief”, identificado a partir de um teste empírico do modelo Heckscher-Ohlin-Samuelson (HOS), que previa que países exportariam bens intensivos no fator de produção relativamente abundante e importariam bens intensivos no fator escasso. No entanto, ao analisar os padrões comerciais dos Estados Unidos, país reconhecido como abundante em capital, Leontief observou que suas exportações consistiam, majoritariamente, de bens intensivos em mão de obra, enquanto suas importações eram mais intensivas em capital, contrariando as previsões do modelo teórico (APPLEYARD, 2008; APPLEYARD *et al.*, 2010; FAUSTINO, 1992; NEGEM, 2015). Esse resultado inesperado evidenciou as limitações do modelo HOS, sobretudo sua incapacidade de incorporar fatores como diferenças tecnológicas, economias de escala e a heterogeneidade dos processos produtivos entre países.

De forma semelhante, o caso paranaense pode ser interpretado como uma manifestação atual do Paradoxo de Leontief aplicado à água virtual. A contradição se expressa no fato de que uma região sob crescente pressão ecológica, em termos de disponibilidade e uso de recursos hídricos, se configura como exportadora líquida de água incorporada em bens agrícolas e industriais, como o etanol e o açúcar. Essa dinâmica contraria a lógica da eficiência ambiental, pois desloca água de regiões potencialmente vulneráveis para atender demandas externas, priorizando ganhos econômicos imediatos em detrimento da sustentabilidade dos ecossistemas locais.

A literatura demonstra que os fluxos de água virtual estão fortemente associados à eficiência hídrica regional. Regiões exportadoras, teoricamente, utilizam a água de maneira mais eficiente do que as importadoras (TIAN *et al*., 2018; ZHANG *et al*., 2019; FU *et al.* 2021). Entretanto, essa lógica é insuficiente para explicar os impactos territoriais da exportação de água virtual, especialmente em contextos como o do Paraná, em que a concentração do uso da água em setores específicos pode comprometer a resiliência hídrica local. Ainda que o estado possua relativa disponibilidade hídrica, a distribuição desigual dos usos e os efeitos cumulativos da intensificação agroindustrial, sobretudo no setor abordado por este estudo, tornam urgente a adoção de mecanismos de monitoramento e gestão integrada dos recursos.

A expansão das plantações de cana-de-açúcar pode ocasionar impactos ambientais relevantes, como a degradação do solo, o desmatamento, a perda de biodiversidade e o aumento da erosão. Ademais, o uso intensivo de fertilizantes e pesticidas pode comprometer a qualidade da água, afetando ecossistemas aquáticos. O processo produtivo da cana e seus derivados também está associado às emissões de gases de efeito estufa, sobretudo em função da queima da palha e do processamento industrial. Apesar disso, o etanol representa uma fonte de energia renovável capaz de contribuir para a redução da dependência de combustíveis fósseis e da emissão de carbono a longo prazo (BWAMBALE *et al*., 2022).

A minimização dos impactos relacionados ao comércio de água virtual exige a adoção de práticas de manejo sustentável que contribuam para a redução da pegada hídrica no setor sucroenergético. A gestão adequada dos recursos hídricos pode gerar ganhos ambientais e econômicos, promovendo o uso racional da água na produção da cana-de-açúcar (FITO *et al*., 2017). Entre as estratégias recomendadas destacam-se o reaproveitamento de águas residuais e a captação de água da chuva, especialmente em períodos de estiagem (BORDONAL *et al*., 2018).

A adoção de tecnologias de irrigação eficiente, como o gotejamento, reduz consideravelmente o consumo de água ao fornecer diretamente às raízes a quantidade necessária, evitando perdas por evaporação. O uso de sensores de umidade do solo contribui para a irrigação de precisão, evitando tanto o desperdício quanto o estresse hídrico. Estudos recentes evidenciam a necessidade de modelos

matemáticos que integrem variáveis climáticas, edáficas e fisiológicas, associadas ao controle preditivo, para otimizar o uso da água (BWAMBALE *et al*., 2022).

Outras práticas sustentáveis incluem a rotação de culturas, que favorece a saúde do solo e o controle de pragas, bem como a cobertura vegetal, que auxilia na retenção de umidade, na estabilidade térmica e na prevenção da erosão. O desenvolvimento de cultivares mais tolerantes à seca também se mostra essencial para a resiliência produtiva frente às mudanças climáticas (KASSAM, 2013; BORDONAL *et al*., 2018; NAVARRO-RAMIREZ *et al*., 2020; BWAMBALE *et al*., 2022).

A intensificação da participação do Paraná no comércio de água virtual, especialmente por meio do setor sucroenergético, torna evidente a necessidade de políticas voltadas à sustentabilidade hídrica. O elevado volume de exportações de produtos hidrointensivos, como o açúcar e o etanol, demonstra o descompasso entre os ganhos econômicos e a pressão ambiental sobre os mananciais. Nessa perspectiva, a formulação e implementação de instrumentos de manejo eficiente e responsável tornam-se fundamentais.

No Paraná as políticas públicas estaduais evidenciam avanços na construção de uma governança hídrica mais integrada e participativa. O Decreto Estadual nº 9.130/2010 representa um marco regulatório ao disciplinar a criação dos Comitês de Bacia Hidrográfica (CBHs), previstos na Lei Estadual nº 12.726/1999. Esses colegiados exercem funções normativas e deliberativas, como a aprovação de planos de bacia, a proposição de critérios para outorga e cobrança pelo uso da água, e a mediação de conflitos em primeira instância administrativa.

O decreto estadual referenciado assegura representatividade paritária entre o poder público, os usuários e a sociedade civil, incluindo comunidades tradicionais, fortalecendo os princípios democráticos da gestão hídrica, haja vista o meio ambiente sustentável ser um direito socialmente difuso. A institucionalização de mecanismos de deliberação coletiva, transparência e corresponsabilidade está alinhada ao Pacto pela Governança da Água, proposto pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

Entretanto, a eficácia dessas diretrizes depende da participação ativa e qualificada dos diversos atores sociais. Estudos demonstram que a centralidade decisória ainda se concentra nas agências governamentais, enquanto setores como o agrícola ou regiões rurais isoladas permanecem em posições periféricas nos arranjos institucionais. Essa assimetria demanda a construção de redes colaborativas e o fortalecimento da capacidade deliberativa de todos os segmentos (FLIERVOET *et al*., 2016; KHARANAGH *et al*., 2020; NABIAFJADI *et al*., 2021; GATT, 2016; DELGADO *et al*., 2021).

Complementarmente, iniciativas locais com apoio de ONGs e outros *stakeholders* são fundamentais para proteger fontes hídricas vulneráveis e enfrentar os impactos da exportação de água

virtual. Para tanto, é imprescindível investir em educação hídrica, divulgação de informação técnica e capacitação comunitária, promovendo o engajamento qualificado dos usuários e a compreensão dos sistemas de gestão (VOS; HINOJOSA, 2016).

No contexto recente, destaca-se a instituição do Programa Estadual de Segurança Hídrica na Agricultura, estabelecido pela Lei nº 21.994/2024 e regulamentado pelo Decreto nº 8.803/2025. Essa política busca apoiar a gestão eficiente da água no meio rural por meio de subvenções econômicas, reembolsáveis ou não, destinadas a agricultores familiares e organizações coletivas. As práticas incentivadas incluem proteção de nascentes, reservatórios, reuso de efluentes e modernização dos sistemas de irrigação. Alinhadas à literatura especializada, essas diretrizes estimulam o uso de tecnologias de eficiência hídrica, como sensores de umidade, rotação de culturas e cultivares resistentes à seca.

O programa adota ainda critérios de priorização regional, como a ocorrência de bacias com baixa vazão outorgável e o histórico de perdas agropecuárias por estresse hídrico. A liberação dos recursos depende da apresentação de projetos tecnicamente estruturados e do acompanhamento por assistência técnica especializada, reforçando a governança e a *accountability*. Do ponto de vista institucional, a criação da Unidade Técnica do Programa (UTP) assegura a articulação entre Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento (SEAB), Secretaria do Desenvolvimento Sustentável (Sedest), Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná (IDR-Paraná) e Instituto Água e Terra (IAT) para monitorar, planejar e avaliar as ações.

Ademais, a possibilidade de articulação com fontes de financiamento federais e internacionais amplia o escopo e a sustentabilidade da política. Mecanismos de bonificação por boas práticas e apoio emergencial frente a eventos climáticos extremos também estão previstos, reconhecendo a crescente vulnerabilidade do meio rural. Para tanto, a efetividade do programa dependerá de aporte orçamentário consistente, da atuação da extensão rural e da equidade no acesso aos instrumentos, sobretudo para os pequenos produtores. Frente à complexidade do comércio de água virtual, impõe-se uma abordagem sistêmica, multiescalar e integrada de planejamento e gestão ambiental.

O setor sucroenergético do Paraná enfrenta um desafio estratégico central: compatibilizar os benefícios econômicos gerados pelas exportações de commodities, como açúcar e etanol, com a preservação ambiental nos territórios de origem. Embora o crescimento econômico acelerado contribua para o fortalecimento da balança comercial, ele também pode ocasionar impactos ambientais significativos, sobretudo relacionados à degradação dos recursos naturais, à perda da qualidade da água e ao aumento das emissões de gases de efeito estufa (FENG *et al*., 2024).

A maximização dos ganhos oriundos do comércio internacional não deve ocorrer em detrimento da sustentabilidade ecológica. Tal prática comprometeria a resiliência hídrica e a viabilidade de longo

prazo não apenas do setor sucroenergético, mas de todo o sistema agrícola regional. Conforme argumentam Feng *et al*. (2024), torna-se necessário formular políticas públicas coerentes que articulem crescimento econômico e conservação ambiental, promovendo sinergias entre os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente aqueles relacionados à proteção dos ecossistemas terrestres (ODS 15), à ação climática (ODS 13) e à gestão sustentável da água (ODS 6).

As empresas do complexo sucroenergético devem adotar práticas sustentáveis que contribuam para mitigar os impactos ambientais e enfrentar a escassez hídrica associada à produção. Isso envolve não apenas a redução das emissões decorrentes das atividades agrícolas e industriais, mas também a implementação de sistemas de gestão hídrica mais eficientes. Nesse contexto, a eficiência hídrica desponta como uma exigência estratégica, tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico, especialmente diante da urgência de alinhar os modelos produtivos às metas globais de sustentabilidade hídrica (VELASCO-MUÑOZ *et al*., 2018; GILLET; BIANCALANI, 2022).

O indicador 6.4.1 dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, que mensura a mudança na eficiência do uso da água ao longo do tempo, representa um instrumento estratégico para avaliar a relação entre crescimento econômico e sustentabilidade hídrica. A métrica expressa o valor adicionado por unidade de volume de água utilizada (em dólares por metro cúbico), permitindo mensurar a produtividade hídrica dos setores agrícola, industrial e de serviços. Este indicador oferece uma base técnica para a formulação de políticas públicas orientadas à transição para modelos de desenvolvimento mais eficientes no uso dos recursos naturais, especialmente em regiões com elevado consumo de água associado à produção agroindustrial (GILLET; BIANCALANI, 2022; ANA, 2022).

No contexto do setor sucroenergético do estado do Paraná, a aplicação do referido indicador adquire especial relevância. A produção de açúcar e etanol, fortemente dependente de grandes volumes de água tanto no cultivo da cana-de-açúcar quanto nos processos industriais de transformação, representa um vetor expressivo do comércio de água virtual. Elevar a produtividade hídrica do setor implica reduzir o estresse sobre os mananciais e agregar valor aos produtos exportados, contribuindo para a competitividade internacional do complexo sucroenergético paranaense.

As políticas públicas atualmente em vigor no Paraná convergem com os princípios subjacentes ao indicador 6.4.1. A promoção do uso racional da água tem ocorrido por meio de incentivos econômicos, apoio técnico e fomento à adoção de tecnologias como irrigação localizada, sensores de umidade do solo, reuso de águas residuais e conservação de nascentes. Essas iniciativas podem elevar a eficiência do uso da água, ao mesmo tempo em que fortalecem a resiliência produtiva frente às mudanças climáticas e reduzem os impactos hídricos do setor.

A implementação do indicador ODS 6.4.1 como ferramenta de monitoramento pode contribuir ainda mais para a definição de metas específicas de produtividade hídrica nos polos sucroenergéticos do estado. Ao integrar dados econômicos e hidrológicos, o indicador permite desenvolver estratégias multiescalares e territorializadas que conciliem as metas de crescimento do setor com os compromissos de sustentabilidade previstos na Agenda 2030. Dessa forma, a incorporação do ODS 6.4.1 ao planejamento agrícola e ambiental do Paraná fortalece a governança hídrica e sinaliza o alinhamento do estado às diretrizes internacionais de uso sustentável da água.

Nesse cenário, a articulação com Instituições de Ciência e Tecnologia (ICT) configura-se como etapa complementar à ação estatal, possibilitando a criação de soluções tecnológicas e inovações adaptadas às especificidades regionais. A ampliação da produção e da disseminação de tecnologias voltadas à racionalização do uso da água e à mitigação dos impactos ecológicos das atividades produtivas reforça o papel estratégico do conhecimento técnico-científico no avanço da sustentabilidade.

A análise do comércio de água virtual sugere que a sustentabilidade do complexo sucroenergético paranaense está diretamente relacionada ao fortalecimento da governança hídrica. A continuidade de seu protagonismo comercial requer o aprimoramento de políticas públicas que equilibrem os benefícios obtidos no mercado externo com a proteção ambiental nos territórios de origem. Nesse sentido, superar o paradoxo de Leontief, que aponta a contradição entre pressões ecológicas locais e exportação líquida de recursos naturais, demanda a reconfiguração das lógicas produtivas e comerciais. A internalização dos custos ecológicos e a redistribuição mais justa da água entre regiões exportadoras e importadoras são etapas essenciais para assegurar justiça hídrica e sustentabilidade de longo prazo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo analisou o comércio de água virtual no setor sucroenergético do Paraná, considerando sua relevância econômica, suas implicações ecológicas e sua relação com as políticas públicas de gestão hídrica. Foram examinados os fluxos internacionais e interestaduais, os impactos ambientais da exportação de produtos hidrointensivos e os instrumentos normativos vigentes no estado. Os resultados mostram que o Paraná é exportador líquido de água virtual, com saldo de 1.571.326 m³ em 2015, concentrado principalmente no açúcar, responsável por 79% das exportações totais e 85,58% do saldo líquido. Embora o etanol tenha maior participação no comércio interno, sua contribuição ao comércio externo é reduzida; já a cana-de-açúcar in natura apresenta baixa participação comercial, mas elevada intensidade hídrica local.

Essa configuração evidencia um paradoxo: mesmo sob crescente pressão sobre seus recursos hídricos, o estado exporta volumes expressivos de água virtual, gerando um déficit ecológico em que os ganhos econômicos não correspondem à reposição ou conservação dos recursos. Esse padrão aproxima-se do Paradoxo de Leontief, ao demonstrar que regiões com maior pressão hídrica continuam exportando insumos ambientais. A análise reforça que a eficiência hídrica é estratégica econômica e ambientalmente. Tecnologias de irrigação, reaproveitamento de efluentes e práticas de aumento de produtividade hídrica tornam-se essenciais, e o indicador ODS 6.4.1 mostrou-se relevante para orientar políticas públicas alinhadas à Agenda 2030.

No campo institucional, observou-se avanço da governança hídrica, sobretudo com a atuação dos Comitês de Bacia e com a instituição do Programa Estadual de Segurança Hídrica na Agricultura (Lei nº 21.994/2024). Apesar disso, persistem desafios na articulação entre atores e na capacidade decisória dos colegiados, especialmente em regiões agrícolas. Entre as limitações metodológicas, destaca-se o uso de coeficientes médios para estimar a água virtual importada, o que pode não refletir especificidades regionais. Ainda assim, o estudo contribui para o debate sobre governança da água, internalização de custos ambientais e aprimoramento das políticas públicas.

Como agenda futura, recomenda-se atualizar as matrizes utilizadas, avaliar os efeitos da variabilidade climática sobre o saldo de água virtual, comparar a eficiência hídrica entre estados e países e analisar a efetividade dos instrumentos de gestão recentemente implementados. Conclui-se que o Paraná enfrenta o desafio de conciliar competitividade no mercado sucroenergético com a preservação de seus ecossistemas hídricos, exigindo reconfiguração produtiva, fortalecimento das políticas de uso racional da água e maior integração entre governança e sustentabilidade.

Do ponto de vista prático, a aplicação do modelo de insumo-produto oferece uma metodologia robusta e replicável, capaz de orientar decisões públicas e privadas. As empresas do setor podem utilizar os resultados para otimizar o uso da água, reduzir custos, mitigar riscos de escassez e fortalecer estratégias ESG e de responsabilidade socioambiental. As informações geradas podem ainda apoiar o planejamento estratégico, a conformidade regulatória e a identificação de oportunidades para cadeias produtivas mais resilientes e sustentáveis. Além disso, os achados estimulam abordagens interdisciplinares que articulem economia, gestão hídrica e sustentabilidade, abrindo caminhos para estudos sobre outras commodities, regiões e séries temporais.

REFERÊNCIAS

ALLAN, J. A. “Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydro-political futures would be impossible”. *In*: ODA - Overseas Development Administration. **Priorities for water resources allocation and management**. London: ODA, 1993.

ALLAN, J. A. **Virtual water**: a long term solution for water short Middle Eastern economies?. London: University of London, 1997.

ALLAN, T. **Virtual Water**: tackling the threat to our planet's most precious resource. New York: L.B. Tauris, 2011.

ALMEIDA, A. R.; REIS NETO, J. F. “Análise da água virtual aplicada no complexo sucroenergético do Paraná na perspectiva de consumo”. **Boletim de Conjuntura (BOCA)**, vol. 18, n. 52, 2024.

ALMEIDA, A. R.; REIS NETO, J. F. “O papel do comércio de água virtual na distribuição dos recursos hídricos globais”. **Encontro Internacional de Gestão, Desenvolvimento e Inovação**, vol. 6, n. 1, 2022.

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **ODS 6 no Brasil**: visão da ANA sobre os indicadores. Brasília: ANA, 2022. Disponível em: <www.gov.br>. Acesso em: 12/07/2025.

ANA - Agência Nacional de Águas. **Levantamento da cana-de-açúcar irrigada e fertirrigada no Brasil**. Brasília: ANA, 2019. Disponível em: <www.gov.br>. Acesso em: 12/07/2025.

APPLEYARD, D. R. “Heckscher-Ohlin Samuelson Model”. *In*: DARITY JUNIOR, W. A. (ed.). International Encyclopedia of the Social Sciences. New York: Macmillan Reference USA, 2008.

APPLEYARD, D. R. *et al*. **International Economics**. New York: McGraw-Hill Education, 2010.

AVISO, K. B. *et al*. “A multi-region input-output model for optimizing virtual water trade flows in agricultural crop production”. **Management of Environmental Quality**, vol. 29, n. 1, 2018.

BORDONAL, R. D. O. *et al*. “Sustainability of sugarcane production in Brazil. A review”. **Agronomy for Sustainable Development**, vol. 38, n. 2, 2018.

BOUHIA, H. **Water in the macro economy**: Inte-grating economics and engineering into an analytical model. Ashgate studies in environmental and natural resources economics. Aldershot: Ash-gate Publishing Limited, 2001.

BRASIL. **Anuário do Comércio Exterior Brasileiro 2020**. Brasília: Secretária Especial de Comércio Exterior e Assuntos Internacionais, 2021. Disponível em: <www.gov.br>. Acesso em: 12/07/2025.

BRASIL. **Anuário do Comércio Exterior Brasileiro de serviços 2020**. Brasília: SECEX, 2020.

BRASIL. **Balança comercial brasileira**: boletim trimestral. Brasília: Secretária Especial de Comércio Exterior e Assuntos Internacionais, 2022. Disponível em: <www.gov.br>. Acesso em: 12/07/2025.

BWAMBALE, E. *et al*. “Smart irrigation monitoring and control strategies for improving water use efficiency in precision agriculture: A review”. **Agricultural Water Management**, vol. 260, 2022.

CASTELAO, R. A. *et al*. "Aplicações da Matriz Insumo-Produto em análises ambientais no Brasil: uma revisão sistemática de literatura". **Ciência e Natura**, vol. 41, n. 17, 2019.

CEPEA - Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. **Sumário executivo PIB do agronegócio 4º trimestre de 2023**. Piracicaba: CEPEA, 2024. Disponível em: <www.cepea.org.br>. Acesso: 23/05/2025.

CHEN, W. *et al*. "Virtual water export and import in china's foreign trade: A quantification using input-output tables of China from 2000 to 2012". **Resources, Conservation and Recycling**, vol. 132, 2018.

DELGADO, L. E. *et al.* "Water governance in rural communities of Chiloé Island, southern Chile: a multi-level analysis". **Journal of Rural Studies**, vol. 83, 2021.

DENG, G. *et al*. "Social network analysis of virtual water trade among major countries in the world". **Science of The Total Environment**, vol. 753, 2021.

DENG, G; LIU Y. "Research on China's Virtual Water Trading Regarding the Differences between Countries and Industries from the Global Perspective". **Polish Journal of Environmental Studies**, vol. 30, n. 3, 2021.

DINESH KUMAR, M. "Physical transfer of water versus virtual water trade: economic and policy considerations". **Water Economics and Policy**, vol. 4, n. 3, 2018.

FAUSTINO, H. C. "O paradoxo de Leontief no quadro das varias teorias do comercio internacional". **Estudos de Economia**, vol. 7, n. 2, 1992.

FENG, S.; *et al*. "The intersection of economic growth and environmental sustainability in China: Pathways to achieving SDG". **Energy Strategy Reviews**, vol. 55, 2024.

FITO, J. *et al*. "Water Footprint as an Emerging Environmental Tool for Assessing Sustainable Water Use of the Bioethanol Distillery at Metahara Sugarcane Farm, Oromiya Region, Ethiopia". **Water Conservation Science and Engineering**, vol. 2, n. 4, 2017.

FLIERVOET, J. M. *et al*. "Analyzing collaborative governance through social network analysis: a case study of river management along the Waal River in The Netherlands". **Environ Manag**, vol. 57, 2016.

FU, T.; XU, C.; HUANG, X. "Analysis of Virtual Water Trade Flow and Driving Factors in the European Union". **Water**, vol. 13, 2021.

FU, Y. *et al.* "Multi-hierarchy virtual-water management: A case study of Hubei Province, China". **Journal of Cleaner Production**, vol. 293, 2021.

GAO, D. *et al*. "Assessment of Inter-Sectoral Virtual Water Reallocation and Linkages in the Northern Tianshan Mountains, China". **Water**, vol. 2363, n. 12, 2020.

GATT, K. "Social network analysis as a tool for improved water governance in Malta". **International Journal of Society Systems Science**, vol. 8, n. 2, 2016.

GERBENS-LEENES W; HOEKSTRA, A. Y. "The water footprint of sweeteners and bio-ethanol". **Environ Internacional**, vol. 40, 2012.

GILLET, V.; BIANCALANI, R. **Diretrizes para o cálculo da eficiência no uso da água na agricultura para os relatórios globais - Parâmetros agronómicos no indicador do ODS 6.4.1**: rácio de rendimento e proporção da produção de sequeiro. Roma: FAO. 2022.

GKATSIKOS, A.; MATTAS, K. "The Paradox of the Virtual Water Trade Balance in the Mediterranean Region". **Sustainability**, vol. 13, n. 2978, 2021.

GUAN, D.; HUBACEK, K. "Assessment of regional trade and virtual water flows in China". **Ecological economics, Hanover**, vol. 61, n. 1, 2007.

GUILHOTO, J. **Análise de Insumo-Produto**: teoria, fundamentos e aplicações. São Paulo: Editora USP, 2009.

GUILHOTO, J. J. M. **Análise de insumo-produto:** teoria, fundamentos e aplicações. São Paulo: Editora USP, 2011.

GUO, S.; SHEN, G. Q. "Multiregional input-output model for china's farm land and water use". **Environmental Science e Technology**, vol. 49, 2015.

HADDAD, E. A.; MENGOUB, F. E.; VALE, V. A. **Water Content in Trade**: A Regional Analysis for Morocco. Marocco: OCPPC, 2018.

HAO, M. *et al*. "Characteristics of virtual water transfer networks and their influence on the spatial equilibrium of water resources in China". **Ecological Indicators**, vol. 181, 2025.

HASSAN, A. *et al*. "Virtual water trade in industrial products: evidence from Malaysia". **Environment, Development and Sustainability: A Multidisciplinary Approach to the Theory and Practice of Sustainable Development**, vol. 19, n. 3, 2017.

HOEKSTRA, A. Y. "How sustainable is Europe's water footprint?" **Water and Wastewater International**, vol. 26, 2011.

HOEKSTRA, A. Y; HUNG, P. Q. "Virtual Water Trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade". **Value of Water Research Report Series**, n. 11, 2002.

HUBACEK, K.; SUN, L. "Economic and societal changes in China and their effects onwater use a scenario analysis". **Journal of Industrial Ecology**, vol. 9, n. 1, 2005.

JOSEPH, N. *et al*. "A review of the assessment of sustainable water use at continental-to-global scale". **Sustain. Sustainable Water Resources Management**, vol. 6, n. 18, 2020.

KASSAM, A. *et al*. "Sustainable soil management is more than what and how crops are grown". In: KASSAM, A. **Principles of Sustainable Soil Management in Agroecosystems**. Boca Raton: CRC Press, 2013.

KHARANAGH, S. G. *et al*. "An MCDM-based social network analysis of water governance to determine actors' power in water-food-energy nexus". **Journal of Hydrology**, vol. 581, 2020.

LI, P. *et al*. "Spillover of Water Scarcity Risk through Virtual Water Trade in Rapidly Urbanizing Drylands. **International Journal of Disaster Risk Science**, vol. 16, 2025.

LIN, L. *et al*. "Provincial virtual energy-water use and its flows within China: A multi-regional input-output approach". **Resources Conservation and Recycling**, vol. 151, 2019.

LIU, X. *et al*. "Can virtual water trade save water resources?" **Water Research**, vol. 163, 2019.

MACHADO, G. V. **Meio ambiente e comércio exterior**: impactos da especialização comercial brasileira sobre o uso de energia e as emissões de carbono do país (Tese de Doutorado em Planejamento Energético). Rio de Janeiro: UFRJ, 2002.

MARSILY, G. "National water security–Case study of an arid country, Tunisia". **Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration**, vol. 4, n. 11, 2019.

MAYA-JARIEGO, I. "Using stakeholder network analysis to enhance the impact of participation in water governance". **Humanities and social sciences communications**, vol. 11, n. 460, 2024.

MENDES, C. S. *et al*. "Uma Análise do Insumo-Produto do Setor Lácteo Mineiro". **Revista Econômica do Nordeste**, vol. 42, n. 3, 2011.

MILLER, R. E.; BLAIR, P. D. **Input-output analysis**: foundations and extensions. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.

MORIMOTO, Y. "On Aggregation Problems in Input-Output Analysis". **Review of Economic Studies**, vol. 37, n.109, 1970.

NABIAFJADI, S.; SHARIFZADEH, M.; AHMADVAND, M. "Social network analysis for identifying actors engaged in water governance: an endorheic basin case in the Middle East". **Journal of Environmental Management**, vol. 288, 2021.

NAVARRO-RAMÍREZ, V. *et al*. "Methodological frameworks to assess sustainable water resources management in industry: A review". **Ecological Indicators**, vol. 119, 2020.

NEGEM, S. H. "Leontief Paradox: A re-Examination for Egypt". **International Conference on Trends in Business and Economics**. London: ICTBE, 2015.

PARANÁ. **Decreto Estadual n. 9.130, de 22 de outubro de 2010**. Curitiba: Governo do Estado do Paraná, 2010. Disponível em: <www.legislacao.pr.gov.br>. Acesso em: 19/09/2025.

PARANÁ. **Decreto n. 8.803, de 29 de janeiro de 2025**. Curitiba: Governo do Estado do Paraná, 2025. Disponível em: <www.legislacao.pr.gov.br>. Acesso em: 19/09/2025.

PARANÁ. **Lei Estadual n. 12.726, de 28 de novembro de 1999**. Curitiba: Governo do Estado do Paraná, 1999. Disponível em: <www.legislacao.pr.gov.br>. Acesso em: 19/09/2025.

PARANÁ. **Lei Estadual n. 21.994, de 4 de junho de 2024**. Curitiba: Governo do Estado do Paraná, 2024. Disponível em: <www.legislacao.pr.gov.br>. Acesso em: 19/09/2025.

RENAULT, D. "Value of virtual water in food: Principles and virtues". **Value of Water Research Report Series**, vol. 12. n. 13, 2003.

SHEN, M. *et al*. "Virtual water network evolution and its uneven effects on water stress across China's urban agglomerations". **Journal of Cleaner Production**, vol. 526, 2025.

SHTULL-TRAURING, E.; BERNSTEIN, N. "Virtual water flows and water-footprint of agricultural crop production, import and export: A case study for Israel". **Science of the Total Environment**, vol. 622, 2018.

SILVA, T. G. F. *et al*. "Demanda hídrica e eficiência do uso de água da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro". **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, vol. 15, 2011.

SILVA, V. D. P. *et al*. "Measurements and modelling of water footprint of sugarcane cultivated in Paraiba State". **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, vol. 19, n. 6, 2015.

SOARES, R. B. *et al*. "Macroeconomic Accounting of Water Resources: An Input-Output Approach to Linkage Analysis and Impact Indicators Applied to the State of Ceará, Brazil". **Water**, vol. 13, 2021.

SOJAMO, S. *et al*. "Virtual water hegemony: the role of agribusiness in global water governance". **Water International**, vol. 37, n. 2, 2024.

TIAN, G. *et al*. "Virtual Water Flows Embodied in International and Interprovincial Trade of Yellow River Basin: A Multiregional Input-Output Analysis". **Sustainability**, vol. 12, n. 1251, 2020.

TIAN, X. *et al*. "Evolution of China's water footprint and virtual water trade: A global trade assessment". **Environment International**, vol. 121, n. 1, 2018.

VELASCO-MUÑOZ, J. F. *et al*. "Sustainable Water Use in Agriculture: A Review of Worldwide Research". **Sustainability**, vol. 10, n. 4, 2018.

VERMA, S. *et al*. "Going against the flow: A critical analysis of inter-state virtual water trade in the context of India's National River Linking Program". **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, vol. 34, 2009.

VISENTIN, J. C.; SZIGETHY, L. **Inovação tecnológica e sustentabilidade da cadeia de produção**: um exercício para a água no Brasil. Rio de Janeiro: Ipea, 2022.

VOS, J.; HINOJOSA, L. "Virtual water trade and the contestation of hydrosocial territories". **Water International**, vol. 41, n. 1, 2016,

WANG, L. *et al*. "Virtual scarce water flows and economic benefits of the Belt and Road Initiative". **Journal of Cleaner Production**, vol. 253, 2020.

WANG, T. *et al*. "Agricultural and Non-Agricultural Sectors Compete Implicitly for Water Resources in China". **Water**, vol. 17, n. 18, 2025.

WANG, Z. *et al*. "An input–output approach to evaluate the water footprint and virtual water trade of Beijing, China". **Journal of Cleaner Production**, vol. 42, 2013.

WIEDMANN, T. *et al.* "Examining the global environmental impact of regional consumption activities: review of input–output models for the assessment of environmental impacts embodied in trade". **Ecological Economics**, vol. 61, 2007.

WU, H. *et al*. "Interregional flows of virtual cropland within China". **Environmental Research Communications**, vol. 4, n. 7, 2022.

ZANGISK, G. H.; CARVALHO, T. S. “Análise do comercio de água virtual no estado do Paraná: uma abordagem de insumo-produto”. **Economia e Região**, vol. 9, n. 2, 2021.

ZANIBONI, P. H.; SCHMIDT, C. A. P. “Gestão de Resíduos Sólidos Gerados em uma Indústria Sucro-Alcooleira Visando seu Correto Armazenamento e Destinação Final”. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, vol. 7, 2014.

ZAREI, M.; NASROLLAHI, Z. “Virtual Water Trade between Iran and the European Union (EU28): A Sectoral-country Analysis Using the Input-output Model”. I**ranian Journal of Economic Studies**, vol. 9, n. 2, 2020.

ZHANG, D. *et al*. “Research on foreign trade, inter-regional trade and virtual water pollution transfer: A study based on the environmental input-output model”. **Process Safety and Environmental Protection**, vol. 205, 2025.

ZHANG, Y.; CHEN, Y.; HUANG, M. “Water Footprint and Virtual Water Accounting for China Using a Multi-Regional Input-Output Model”. **Walter**, vol. 11, n. 1, 2019.

ZHANG, Z.; YANG, H.; SHI, M. “Spatial and sectoral characteristics of China’s international and interregional virtual water flows–based on multi-regional input–output model”. **Economic Systems Research**. vol. 28, n. 3, 2016.

ZHAO, H. *et al*. “Virtual water scarcity risk in China”. **Resources, Conservation and Recycling**, vol. 160, 2020.

ZHAO, X. U. *et al*. “Applying the Input-Output Method to Account for Water Footprint and Virtual Water Trade in the Haihe River Basin in China”. **Environmental Science and Technology**, vol. 44, n. 23, 2010.

ZHAO, X.; CHEN, B.; YANG, Z. F. National water footprint in an input–output framework: A case study of China. **Ecological modelling**, v. 220, 2009.

ZHENG, X. *et al*. “Unequal waterscapes: Tracing urban virtual water flows and intercity inequality in China”. **Journal of Cleaner Production**, vol. 533, 2025.



BOLETIM DE CONJUNTURA (BOCA)

Ano VII | Volume 24 | Nº 71 | Boa Vista|2025

http://www.ioles.com.br/boca

Editor chefe:

Elói Martins Senhoras

Conselho Editorial

Antonio Ozai da Silva, Universidade Estadual de Maringá

Vitor Stuart Gabriel de Pieri, Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Charles Pennaforte, Universidade Federal de Pelotas

Elói Martins Senhoras, Universidade Federal de Roraima

Julio Burdman, Universidad de Buenos Aires, Argentina

Patrícia Nasser de Carvalho, Universidade Federal de Minas Gerais

Conselho Científico

Claudete de Castro Silva Vitte, Universidade Estadual de Campinas

Fabiano de Araújo Moreira, Universidade de São Paulo

Flávia Carolina de Resende Fagundes, Universidade Feevale

Hudson do Vale de Oliveira, Instituto Federal de Roraima

Laodicéia Amorim Weersma, Universidade de Fortaleza

Marcos Antônio Fávaro Martins, Universidade Paulista

Marcos Leandro Mondardo, Universidade Federal da Grande Dourados

Reinaldo Miranda de Sá Teles, Universidade de São Paulo

Rozane Pereira Ignácio, Universidade Estadual de Roraima