

Avaliação da ecoeficiência no uso de recursos hídricos em setores produtivos no Brasil

Evaluation of eco-efficiency in water resource use in productive sectors in Brazil

Aline Lopes¹, Lilian Camillo², Vanessa Campagnoli Ursulino³, Maria de Los Angeles Perez Lizama⁴, Paula Polastri⁵, José Eduardo Gonçalves⁶

RESUMO: A ecoeficiência no uso dos recursos hídricos representa um dos maiores desafios para a sustentabilidade dos setores produtivos no Brasil, principalmente diante da crescente demanda por água e da intensificação dos efeitos das mudanças climáticas. Este estudo avaliou a ecoeficiência hídrica em diferentes setores econômicos do Brasil, com base em dados públicos extraídos da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e do Censo Agropecuário do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Foram utilizados indicadores como consumo hídrico setorial e pegada hídrica. A análise estatística dos dados da ANA, revelou que a agropecuária, especificamente a irrigação, é o setor de maior consumo de água, com baixa eficiência no uso e reuso. Em contrapartida, os setores industriais e de serviços apresentaram melhores índices de reutilização, associados ao uso de tecnologias avançadas. O setor de saneamento demonstrou desempenho variável, dependendo do nível de investimento em infraestrutura. A pegada hídrica foi mais expressiva na agropecuária, responsável por mais de 65% do total nacional. Os resultados evidenciam a necessidade de políticas públicas integradas e investimentos em tecnologias sustentáveis, especialmente na agropecuária, para melhorar a gestão da água, reduzir desperdícios e assegurar a sustentabilidade hídrica no país.

Palavras-chave: Consumo de água; Gestão ambiental; Indicadores ambientais; Pegada hídrica; Sustentabilidade.

ABSTRACT: Eco-efficiency in the use of water resources represents one of the greatest challenges for the sustainability of productive sectors in Brazil, especially in the face of growing water demand and the intensification of climate change impacts. This study assessed water eco-efficiency across different economic sectors in Brazil, using public data from the National Water and Basic Sanitation Agency (ANA), and the Agricultural Census of the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE). Indicators such as sectoral water consumption and water footprint were employed. Statistical analysis of ANA data revealed that agriculture, particularly irrigation, is the largest consumer of water, showing low efficiency in use and reuse. In contrast, the industrial and service sectors presented higher reuse rates, associated with the adoption of advanced technologies. The sanitation sector showed variable performance depending on the level of infrastructure investment. The water footprint was most significant in the agricultural sector, accounting for over 65% of the national total. The findings highlight the need

¹ Doutora em Biologia pelo Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA). Professora do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Limpas (PPGTL), Universidade Cesumar (UniCesumar). Pesquisadora do Instituto Cesumar de Ciência Tecnologia e Inovação (ICETI), Maringá (PR), Brasil.

² Mestranda no Programa de Pós-graduação em Tecnologias Limpas (PPGTL), Universidade Cesumar (UniCesumar), Maringá (PR), Brasil.

³ Mestranda no Programa de Pós-graduação em Tecnologias Limpas (PPGTL), Universidade Cesumar (UniCesumar), Maringá (PR), Brasil.

⁴ Doutora em Ecologia de Ambientes Aquáticos Continentais pela Universidade Estadual de Maringá (UEM). Professora do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Limpas (PPGTL), Universidade Cesumar (UniCesumar). Pesquisadora do Instituto Cesumar de Ciência Tecnologia e Inovação (ICETI), Maringá (PR), Brasil.

⁵ Doutora em Engenharia Química pela Universidade Estadual de Maringá (UEM). Professora do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Limpas (PPGTL), Universidade Cesumar (UniCesumar). Pesquisadora do Instituto Cesumar de Ciência Tecnologia e Inovação (ICETI), Maringá (PR), Brasil.

⁶ Doutor em Química pela Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). Professor do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Limpas (PPGTL), Universidade Cesumar (UniCesumar). Pesquisador do Instituto Cesumar de Ciência Tecnologia e Inovação (ICETI), Maringá (PR), Brasil.

for integrated public policies and investments in sustainable technologies, especially in agriculture, to improve water management, reduce waste, and ensure water sustainability in the country.

Keywords: Environmental indicators; Environmental management; Sustainability; Water consumption; Water footprint.

Autor correspondente: Aline Lopes
E-mail: aline.llopes@unicesumar.edu.br

Recebido em: 2025-07-28
Aceito em: 2025-11-24

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por água potável, juntamente com a degradação dos recursos hídricos, apresenta desafios significativos à sustentabilidade ambiental e ao desenvolvimento econômico. Fatores como crescimento populacional, urbanização e mudanças climáticas, aliada a distribuição desigual dos recursos hídricos tem intensificado os riscos de escassez de água. (Guyman, 2024). No Brasil, a variabilidade climática associada aos fenômenos *El Niño* e *La Niña* intensifica esses desafios, alterando padrões de precipitação e disponibilidade hídrica (Rodrigues *et al.*, 2023). Neste contexto, as interconexões entre água, energia, alimentos e meio ambiente destacam a necessidade de abordagens integradas de gestão para lidar com essas crises (Zahedi *et al.*, 2024).

A ecoeficiência hídrica surge como uma estratégia fundamental para alinhar a produtividade econômica com a conservação ambiental, promovendo o uso racional da água nos processos produtivos. Definida como a otimização do uso dos recursos naturais na produção de bens e serviços, busca maximizar os benefícios econômicos ao mesmo tempo em que minimiza impactos ambientais negativos (Sala-Garrido *et al.*, 2022). As práticas eficazes incluem microirrigação e agricultura de conservação, que podem melhorar significativamente a eficiência do uso agrícola da água (Biswas *et al.*, 2024). Na distribuição de água, protocolos para diagnóstico dos sistemas, controle de perdas reais, combate a perdas aparentes e otimização de formas de bombeamento podem reduzir as perdas de água e energia no setor (Nogueira, 2024). Além disso, soluções inovadoras como a dessalinização da água do mar estão sendo exploradas para aumentar o abastecimento de água doce de forma sustentável (Guyman, 2024). Enfrentar esses desafios multifacetados requer políticas abrangentes e esforços colaborativos para garantir a gestão sustentável dos recursos hídricos (Mediaty *et al.*, 2024; Zhou *et al.*, 2024).

A Lei nº 9.433/1997 que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRS), conhecida como a Lei das Águas (Brasil, 1997), representa um marco legal, na gestão dos recursos hídricos (Martins *et al.*, 2025), e estabelece instrumentos como os Comitês de Bacia Hidrográfica (CBHs), o enquadramento de corpos d'água e a outorga de uso. Contudo, a aplicação desses instrumentos ainda enfrenta limitações operacionais, institucionais e de articulação entre os entes federativos. A promulgação da Lei nº 14.026/2020, que atualiza o marco legal do saneamento básico (Brasil, 2020), representa um avanço complementar, ao estabelecer metas para universalização do serviço e redução de perdas. No entanto, a efetividade dessas políticas depende da integração com ações de gestão hídrica e da superação de barreiras técnicas e institucionais, sobretudo nas regiões rurais e nos setores de maior demanda hídrica.

Dentre os diversos setores produtivos, aqueles que utilizam grandes volumes de água, como a agropecuária, a indústria e o saneamento, são alvos prioritários para a implementação de medidas que reduzam o consumo hídrico e aumentem a eficiência no reuso (Biswas *et al.*, 2024). Estudos indicam que a agropecuária responde por aproximadamente 70% do consumo de água doce global, seguida pela indústria (20%) e pelo setor de abastecimento urbano (10%) (FAO, 2021). No Brasil, essa realidade se repete, especialmente na região Centro-Oeste, onde a irrigação intensiva representa a maior fatia do uso da água. Apesar das melhorias na produtividade hídrica das culturas, o consumo hídrico pela produção agrícola aumentou devido à expansão das culturas intensivas em água, exigindo uma mudança para sistemas agroalimentares mais sustentáveis (Mialyk *et al.*, 2024). A indústria, por sua vez, apresenta grande variação na demanda hídrica, dependendo do tipo de produção. Setores como o têxtil, o petroquímico e o siderúrgico figuram entre os que mais consomem água, enquanto outros, como a indústria eletrônica, demandam volumes relativamente menores (Martínez; Ramírez, 2019). A promoção de práticas de reutilização de água é essencial para mitigar a escassez e aumentar a eficiência de recursos em todos os setores (Florides *et al.*, 2024).

Diante desse cenário, a ecoeficiência hídrica se torna uma estratégia crucial para garantir o equilíbrio entre desenvolvimento econômico e preservação ambiental. Métodos avançados de tratamento de águas residuais, como áreas úmidas construídas e biorreatores de membrana, melhoram a qualidade da água enquanto minimizam os impactos ambientais e o consumo de recursos (Ejairu *et al.*, 2024). Programas de coleta e reciclagem de água das chuvas têm demonstrado estratégias eficazes de gestão da água que reduzem a dependência de fontes municipais (Mezilov *et al.*, 2024).

O conceito de pegada hídrica, proposto por Egan (2011), tem sido amplamente utilizado para quantificar o consumo direto e indireto de água em diferentes atividades produtivas. Essa abordagem permite uma avaliação mais abrangente da eficiência hídrica, considerando não apenas o volume de água utilizado, mas também os impactos ambientais associados ao seu consumo (Mizyed *et al.*, 2024). Aprender com as falhas históricas da gestão da água, enfatiza a importância de medidas adaptativas e políticas proativas para garantir a sustentabilidade da água a longo prazo (Jiang *et al.*, 2024).

No contexto brasileiro, a PNRH visa regular a gestão da água por meio de instrumentos como direitos de uso da água e planos de bacias, no entanto, sua implementação enfrenta desafios significativos. Estudos indicam que, embora tenha havido um aumento nas concessões de água, as práticas de gestão geralmente divergem dos princípios da política, particularmente em áreas rurais, onde pequenos usuários priorizam as fontes de água locais em detrimento da gestão em toda a bacia (Santos *et al.*, 2025; Chiodi, 2023).

Além disso, iniciativas comunitárias como o Programa Um Milhão de Cisternas revelam resultados mistos, com algumas comunidades adotando práticas sustentáveis com sucesso, enquanto outras lutam devido a problemas inadequados de governança e manutenção (Castro *et al.*, 2024). A estrutura de governança abrangente foi ainda mais complicada pelo recente desmantelamento de políticas, que exacerbou as crises hídricas existentes e destacou a necessidade de uma supervisão mais eficaz e o envolvimento da comunidade na gestão dos recursos hídricos (Bezerra; Silva *et al.*, 2019). Assim, enfrentar

esses desafios requer uma abordagem multifacetada que integre as práticas locais às políticas nacionais para melhorar a gestão sustentável da água no Brasil (Kokke, 2023).

A análise da ecoeficiência hídrica requer a utilização de indicadores quantitativos que permitam avaliar o desempenho dos setores produtivos em relação ao uso da água. Entre os principais indicadores estão: 1) Consumo hídrico setorial: volume total de água utilizado por um determinado setor econômico; 2) Eficiência no reuso: percentual de reaproveitamento da água em relação ao consumo total; 3) Pegada hídrica: estimativa do volume de água consumido ao longo da cadeia produtiva, incluindo água azul (superficial e subterrânea), verde (chuva) e cinza (necessária para diluir poluentes).

Estudos destacam que melhorar a produtividade da água na agricultura, em regiões como a Etiópia, pode aumentar significativamente a produção de alimentos e, ao mesmo tempo, reduzir a competição hídrica por meio de técnicas como irrigação por déficit regulada e irrigação por gotejamento (Meskelu, 2024). Em contextos industriais, modelos como o SFA-Tobit mostraram melhorias na eficiência do uso da água em todas as províncias da China, enfatizando o papel dos avanços tecnológicos e dos fatores econômicos (Liu *et al.*, 2024). Além disso, a integração dos princípios da economia circular na Espanha demonstra como a água tratada e reutilizada pode mitigar as ineficiências no uso da água (André *et al.*, 2024).

Nesse cenário, torna-se essencial compreender como os diferentes setores econômicos consomem e gerenciam os recursos hídricos, especialmente diante das pressões ambientais e da necessidade de transição para modelos produtivos mais sustentáveis.

Este estudo tem como objetivo avaliar a ecoeficiência hídrica nos principais setores produtivos no Brasil (como agropecuária, indústria e saneamento), utilizando dados públicos para identificar padrões de consumo, reuso e pegada hídrica. A partir dessa análise, pretende-se fornecer subsídios para a formulação de estratégias que otimizem o uso da água e reduzam impactos ambientais associados ao seu consumo. Além disso, busca-se contribuir para o aprimoramento das políticas públicas e das práticas empresariais relacionadas à gestão sustentável dos recursos hídricos. A identificação de setores com baixo desempenho pode orientar a implementação de medidas regulatórias e incentivos econômicos para estimular o uso eficiente da água. Além disso, a divulgação de boas práticas pode incentivar empresas e produtores a adotarem tecnologias inovadoras para reduzir seu impacto hídrico.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo é de natureza quantitativa, descritiva e analítica, com foco na avaliação da ecoeficiência hídrica em setores produtivos brasileiros. Para isso, foram utilizados dados secundários, combinando (i) avaliação estatística de bases nacionais e (ii) síntese narrativa de literatura e bancos de dados internacionais. Não se trata de um experimento ou levantamento primário, mas de uma integração entre diferentes fontes consolidadas.

As informações foram coletadas a partir das seguintes fontes: Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), Censo Agropecuário do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e relatórios da Agência Nacional de Águas e Saneamento

Básico (Brasil, 2024). A seleção dessas fontes se deve à sua abrangência nacional, atualidade e confiabilidade técnico-institucional.

Os indicadores selecionados para a análise da ecoeficiência hídrica foram: a) Consumo hídrico setorial (m^3/s): volume total de água utilizado por setor econômico; b) Eficiência no reuso (m^3/ano): volume de reuso da água; c) Pegada hídrica (hm^3/ano): estimativa do volume de água consumido ao longo da cadeia produtiva, considerando os componentes azul (superficial e subterrânea), verde (chuva) e cinza (necessária para diluição de poluentes), que são considerados os principais indicadores conforme a abordagem metodológica de Egan (2011).

A análise estatística foi realizada por meio de estatística descritiva (médias e desvios-padrão) e inferencial. A comparação do consumo de água entre setores produtivos ao longo do período de 2019 a 2022 foi realizada por meio da Análise de Variância de Medidas Repetidas (ANOVA), seguida do teste de Tukey com nível de significância de 5% ($p < 0,05$). Os dados foram organizados em planilhas eletrônicas e tratados no software R 4.3.3.

Essa abordagem permitiu identificar diferenças estatísticas relevantes entre os setores, caracterizar a eficiência no uso da água e evidenciar os gargalos e potencialidades para a gestão sustentável dos recursos hídricos no país.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos dados obtidos entre 2019 e 2022 confirma que a agropecuária é o setor com maior demanda hídrica no Brasil (Tabela 1), superando amplamente os demais setores produtivos. A análise estatística utilizando a ANOVA de medidas repetidas revelou diferenças estatisticamente significativas no consumo de água entre os setores ($F = 775,4$; $p < 0,001$).

O teste de Tukey, aplicado para comparar as médias de consumo entre os setores, indicou que a irrigação, componente predominante da agropecuária, apresentou o maior consumo médio de água, com $1.128,87 \pm 70,58 \text{ m}^3/\text{s}$, significativamente superior aos setores de abastecimento urbano ($480,24 \pm 5,95 \text{ m}^3/\text{s}$) e industrial ($186,54 \pm 3,02 \text{ m}^3/\text{s}$) (Tabela 1).

Os resultados corroboram com os dados da *Food and Agriculture Organization* (FAO) (FAO, 2021), confirmando que a agropecuária é o setor mais intensivo no uso de água no Brasil, com um consumo muito superior aos outros setores, segundo os quais, a agricultura é responsável por cerca de 70% do consumo global de água doce. No Brasil, a irrigação intensiva, especialmente na região Centro-Oeste, é a principal responsável por esse alto consumo (Mialyk *et al.*, 2024). Apesar de avanços na eficiência hídrica das culturas, como o uso de tecnologias de microirrigação e técnicas de irrigação por gotejamento, a expansão de áreas irrigadas e o cultivo de culturas com alta demanda hídrica contribuem para o aumento da pegada hídrica da agricultura (Meskelu, 2024).

Tabela 1. Consumo de água por setor econômico no Brasil (média de 2019 a 2022)

Setor	Média de consumo (m ³ /s)
Irrigação	1.128,87 ± 70,58 a
Abastecimento urbano	480,24 ± 5,95 b
Indústria	186,54 ± 3,02 c
Dessedentação animal	161,89 ± 2,44 c
Termelétrica	89,22 ± 13,06 d
Abastecimento rural	33,24 ± 0,32 d
Mineração	29,83 ± 1,55 d

Nota: Os valores médios e o desvio padrão são apresentados. Letras diferentes representam diferença estatística entre as médias, com intervalo de confiança de 95% ($p < 0,05$). Fonte: ANA (2024).

No setor industrial, observou-se um padrão de consumo mais moderado, embora haja variações relevantes conforme o tipo de atividade. Setores como o têxtil, petroquímico e siderúrgico estão entre os maiores consumidores, enquanto setores como o eletrônico apresentam demandas significativamente menores (Schmitz; Bittencourt, 2017). A eficiência no reuso de água dentro da indústria tem se mostrado uma estratégia eficaz para reduzir a pegada hídrica. Setores que implementaram tecnologias avançadas de tratamento e reutilização de efluentes, como o uso de biorreatores e sistemas de membranas, demonstraram melhorias substanciais na eficiência hídrica (Ejairu *et al.*, 2024; Liu *et al.*, 2024). Cavalcante *et al.* (2013) notam baixa adoção de tecnologias de reuso na indústria de bebidas, mesmo em áreas com água abundante.

O setor de saneamento básico, por sua vez, apresentou variações significativas na eficiência hídrica entre diferentes regiões do Brasil. As diferenças estão ligadas à infraestrutura instalada, ao grau de urbanização e aos investimentos em coleta e tratamento de águas residuais. Embora o consumo absoluto seja inferior ao da agropecuária e da indústria, o sistema de abastecimento urbano enfrenta perdas significativas, tanto reais quanto aparentes, que comprometem a eficiência hídrica (Santos *et al.*, 2025). No entanto, programas de gestão da água, como a coleta e reciclagem de águas pluviais, têm se mostrado estratégias eficazes, principalmente em áreas urbanas, contribuindo para a redução da dependência de fontes de água potável e o aumento da eficiência hídrica (Mezilov *et al.*, 2024).

A eficiência do uso da água, reforça essas diferenças entre os setores (Tabela 2). Enquanto os serviços apresentam os maiores índices (53,8 USD/m³), a agropecuária revela a menor eficiência relativa (0,3 USD/m³), refletindo uma baixa relação entre consumo e retorno econômico. Adicionalmente, os resultados indicam que setores com maior acesso a infraestrutura avançada e regulamentação mais rigorosa, como a indústria, apresentam melhor desempenho na ecoeficiência hídrica. Isso está alinhado com os achados de estudos internacionais que demonstram que a implementação de tecnologias de tratamento e reutilização pode reduzir drasticamente a demanda por novos recursos hídricos (Chapagain; Hoekstra, 2004). Por outro lado, setores como a agropecuária, que dependem fortemente de fontes naturais de água, apresentam maior dificuldade em alcançar altos índices de ecoeficiência devido à falta de incentivos econômicos e políticas públicas eficazes (Falkenmark; Rockström, 2006).

Tabela 2. Eficiência média no uso da água por setor econômico (USD/m³)

Setor	Eficiência no uso
Agropecuária	0,3
Indústrias	34,5
Serviços	53,8
Total	21,2

Fonte: FAO (2018).

Em termos de indicadores de ecoeficiência, a pegada hídrica emerge como uma ferramenta importante para avaliar o impacto ambiental do uso da água, considerando não apenas o consumo direto, mas também os impactos indiretos, como a poluição associada ao uso da água (Egan, 2011). Essa abordagem permite uma análise mais holística da eficiência hídrica, integrando a conservação dos recursos hídricos com os objetivos de desenvolvimento econômico.

A análise da pegada hídrica, outro indicador de ecoeficiência, revelou diferenças substanciais entre os setores produtivos (Tabela 3). O setor agropecuário apresentou a maior pegada hídrica total, devido ao alto consumo de água para irrigação e produção animal (65,3 %). A indústria demonstrou uma pegada significativamente menor, atribuída ao maior índice de reutilização da água e a processos produtivos mais eficientes (16,5%). O setor de saneamento, embora consuma menos água em termos absolutos, tem um impacto relevante devido às perdas no sistema de distribuição e ao desperdício (10,1%). Esses dados demonstram que, mesmo com menor consumo absoluto em alguns casos, os impactos indiretos, como poluição e degradação ambiental, também devem ser considerados na avaliação da eficiência setorial (Egan, 2011; Garrido *et al.*, 2020), fortalecendo a necessidade de regulamentações mais rigorosas e investimentos em tecnologias de reuso (Garrido *et al.*, 2020).

Tabela 3. Pegada hídrica na economia brasileira no ano de 2015 e estimativa de reuso da água em 2025

Setor	Pegada hídrica (hm ³ /ano)	Participação na pegada hídrica nacional	Reuso da água (milhões m ³ /ano)
Agropecuária	14.377	65,3%	Sem estimativa
Indústrias	3.633	16,5%	31,5
Saneamento	2.219	10,1%	71,5
Outros (transporte, serviços, informação e comunicação, administração pública)	1.777	8,1%	Sem estimativa

Fonte: Montoya (2020), Agência INFRA (2025).

Além disso, políticas públicas e medidas regulatórias têm um papel crucial na promoção da ecoeficiência hídrica. A Política Nacional de Recursos Hídricos - Lei nº 9.433/1997 (Brasil, 1997) e os planos de bacias são instrumentos importantes, mas sua implementação ainda enfrenta desafios, especialmente nas áreas rurais, onde a gestão descentralizada e a falta de governança dificultam a adesão a práticas sustentáveis (Bezerra; Silva *et al.*, 2019). A integração de práticas locais e o fortalecimento da governança comunitária são fundamentais para melhorar a gestão dos recursos hídricos e garantir a sustentabilidade no longo prazo (Kokke, 2023).

Com base nos resultados, é evidente que a ecoeficiência hídrica deve ser uma prioridade para os setores produtivos no Brasil, com ênfase na implementação de tecnologias de reuso e no aprimoramento das políticas públicas. A promoção de boas práticas e o incentivo ao uso eficiente da água são essenciais para garantir a sustentabilidade dos recursos hídricos no país.

A análise regional da eficiência hídrica nos setores produtivos do Brasil evidencia a diversidade de desafios e soluções adotadas conforme o contexto geográfico e econômico (Quadro 1). Em nível nacional, o uso intensivo da água voltado à exportação, aliado aos fluxos indiretos de consumo, tem sido abordado por meio de modelagens de insumo-produto e análises de cenários (Montoya; Finamore, 2020; Picoli, 2016; Visentin; Szigethy, 2022).

Quadro 1. Variações regionais e setoriais do uso da água no Brasil

Região	Setores principais	Desafios de eficiência	Soluções implementadas	Referência
Nacional	Agronegócio, agricultura, indústria	Alto uso para exportação; fluxos indiretos	Modelagem insumo-produto; análise de cenários	Montoya e Finamore (2020); Picoli (2016); Visentin e Szigethy (2022)
Paraná	Abate de aves	Uso intenso de água de processo; restrições legais	Otimização de processo; melhorias de equipamento	Barana <i>et al.</i> (2014)
Ceará	Coco, melão	Escassez hídrica; gestão da irrigação	Monitoramento, irrigação deficitária, ensaios de campo	Miranda <i>et al.</i> (2019); Monteiro <i>et al.</i> (2008)
Pernambuco	Cana, indústria, serviços	Escassez; impactos regulatórios; compensações setoriais	Modelagem integrada; instrumentos de alocação econômica	Moraes <i>et al.</i> (2021)
Paraíba	Cana	Otimização da irrigação/zincagem	Ensaio de blocos ao acaso; níveis ideais de irrigação	Farias <i>et al.</i> (2008)
Bacia do São Francisco	Cana	Apenas 56% da água usada; eficiência sazonal	Irrigação estratégica; análise do balanço hídrico	Silva <i>et al.</i> (2011)
Pará	Bebidas	Alto consumo, baixa racionalização	Pesquisa, pegada hídrica; chamada por incentivos	Cavalcante <i>et al.</i> (2013)

No Paraná, o setor de abate de aves apresenta elevado consumo de água nos processos industriais e restrições regulatórias, respondendo com estratégias de otimização e melhorias tecnológicas (Barana *et al.*, 2014). No semiárido cearense, culturas como coco e melão lidam com a escassez hídrica, sendo a eficiência aprimorada por meio de monitoramento e irrigação deficitária (Miranda *et al.*, 2019; Monteiro *et al.*, 2008). Pernambuco enfrenta conflitos regulatórios e escassez, buscando equilíbrio setorial com

modelagem integrada e alocação econômica da água (Moraes *et al.*, 2021). Na Paraíba, a eficiência na irrigação da cana-de-açúcar foi aprimorada por ensaios experimentais (Farias *et al.*, 2008). Já na Bacia do São Francisco, apenas 56% da água disponível é utilizada, exigindo intervenções como irrigação estratégica e análises de balanço hídrico (Silva *et al.*, 2011). Por fim, o setor de bebidas no Pará apresenta alto consumo e baixa racionalização, revelando a necessidade de incentivos para adoção de tecnologias mais sustentáveis (Cavalcante *et al.*, 2013).

Em síntese, os resultados mostram que a ecoeficiência hídrica no Brasil apresenta heterogeneidade expressiva entre setores e regiões. A agropecuária, embora estratégica para a economia, demanda atenção prioritária quanto à adoção de práticas e tecnologias mais sustentáveis. A indústria, por sua vez, apresenta potencial de liderar a eficiência no uso da água com base na inovação tecnológica. Já o setor de saneamento requer investimentos contínuos e ações regulatórias para a redução de perdas e ampliação do reuso. A compreensão dessas dinâmicas é essencial para o desenvolvimento de políticas públicas eficazes e de estratégias de gestão que promovam a sustentabilidade hídrica no país.

4 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos evidenciam disparidades marcantes na ecoeficiência hídrica entre os setores produtivos no Brasil. A agropecuária, apesar de sua importância econômica e social, permanece como o setor de maior consumo e menor eficiência no uso da água, sendo responsável por mais de 65% da pegada hídrica nacional. Essa condição sugere a adoção de práticas sustentáveis, como a modernização dos sistemas de irrigação, o manejo racional dos recursos e o incentivo à agricultura de conservação. A indústria, embora consuma menos água em termos relativos, apresenta heterogeneidade quanto à eficiência hídrica, com destaque positivo para os segmentos que adotam tecnologias avançadas de reuso e tratamento de efluentes. Já o setor de saneamento, fortemente influenciado pela infraestrutura disponível e pelos níveis de investimento, ainda enfrenta elevados índices de perdas e baixa taxa de reaproveitamento, sobretudo em regiões menos desenvolvidas.

A análise integrada dos indicadores (consumo, eficiência no reuso e pegada hídrica) reforça a necessidade de estratégias específicas para cada setor, considerando seus perfis tecnológicos, institucionais e territoriais. Nesse contexto, os instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei nº 9.433/1997), aliados ao novo Marco Legal do Saneamento (Lei nº 14.026/2020), podem desempenhar papel central na indução de práticas mais eficientes, desde que implementados de forma articulada e com governança efetiva.

Os resultados reforçam que a promoção da ecoeficiência hídrica necessita da implementação de políticas públicas voltadas para o uso eficiente da água, promovendo incentivos para práticas sustentáveis e inovações tecnológicas. Estratégias como a captação de água da chuva, reuso de efluentes tratados e maior rigor na fiscalização do uso da água podem contribuir significativamente para a redução da pegada hídrica e garantir maior sustentabilidade hídrica a longo prazo.

Estudos futuros podem explorar modelos preditivos para otimizar a gestão hídrica. A adoção de mecanismos de avaliação contínua e o fortalecimento da governança hídrica devem ser priorizados para garantir segurança hídrica no longo prazo.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA INFRA. **Sem normas claras, reúso de água tratada avança pouco no Brasil, diz ANA**. 2025. Disponível em: <https://agenciainfra.com/blog/sem-normas-claras-reuso-de-agua-tratada-avanca-pouco-no-brasil-diz-ana/>. Acesso em: 21 nov. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2023**: informe anual. Brasília: ANA, 2024. Disponível em: https://biblioteca.ana.gov.br/sophia_web/Acervo/Detalhe/106160?returnUrl=/sophia_web/Home/Index&guid=1734307203948. Acesso em: 18 jul. 2024.

ALLAN, J. A. **Virtual water**: tackling the threat to our planet's most precious resource. London: I.B. Tauris, 2011.

ANDRÉ, F. J.; LOPEZ BUENDIA, A. M.; SANTOS-ARTEAGA, F. J. Efficient water use and reusing processes across Spanish regions: a circular data envelopment analysis with undesirable inputs. **Journal of Cleaner Production**, v. 434, p. 139929, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139929>.

BARANA, A. C.; BOTELHO, V.; WIECHETECK, G. K.; DOLL, M. M.; SIMÕES, D. R. **RATIONAL use of water in a poultry slaughterhouse in the state of Paraná, Brazil**: a case study. 2014.

BEZERRA E SILVA, F. C.; LIMA, A. J. R.; CASARIN, F. (Org.). **Protocolo de Monitoramento da Governança das Águas**. Observatório das Águas (OGA), 2019.

BISWAS, A.; SARKAR, S.; DAS, S., DUTTA, S.; CHOUDHURY, M. R.; GIRI, A.; PAUL, D. Water scarcity: a global hindrance to sustainable development and agricultural production – a critical review of the impacts and adaptation strategies. **Cambridge Prisms: Water**, v. 3, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1017/wat.2024.16>.

BRASIL. **Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020**. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, para atribuir à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) competência para editar normas de referência sobre o serviço de saneamento, a Lei nº 10.768, de 19 de novembro de 2003, para alterar o nome e as atribuições do cargo de Especialista em Recursos Hídricos, a Lei nº 11.107, de 6 de abril de 2005, para vedar a prestação por contrato de programa dos serviços públicos de que trata o art. 175 da Constituição Federal, a Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, para aprimorar as condições estruturais do saneamento básico no País, a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, para tratar dos prazos para a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, a Lei nº 13.089, de 12 de janeiro de 2015 (Estatuto da Metrópole),

para estender seu âmbito de aplicação às microrregiões, e a Lei nº 13.529, de 4 de dezembro de 2017, para autorizar a União a participar de fundo com a finalidade exclusiva de financiar serviços técnicos especializados. Brasília, DF: Presidência da República, [2020]. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/114026.htm. Acesso em: 18 jul. 2025.

BRASIL. **Lei nº 9.433, 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. Brasília, DF: Presidência da República, [1997]. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19433.htm. Acesso em: 09 jul. 2025.

CARDOSO CASTRO, P. P., VACHKOVA, M., RAVENA, N., & VELOSO, N. The One Million Cisterns Programme - a viability assessment of community rainwater management in Brazil. **Frontiers in Sustainability**, v. 5, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3389/frsus.2024.1401440>.

CAVALCANTE, L. M.; MACHADO, L. C. G. T.; LIMA, A. M. M. Avaliação do desempenho ambiental e racionalização do consumo de água no segmento industrial de produção de bebidas. **Rev. Ambient. Água**, v. 8 n. 3, 2013 DOI: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1212>.

CHAPAGAIN, A. K.; HOEKSTRA, A. Y. Water footprints of nations. **Value of Water Research Report Series**, Unesco-IHE Institute for Water Education. v. 16, p. 1–76, 2004.

CHIODI, R. E. The National Water Resources Policy and Water Management: considerations about the rural context of the Cantareira System. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, 2023. DOI: <https://doi.org/10.24857/rgsa.v17n10-034>.

EGAN, M. **The water footprint assessment manual: setting the global standard**. London: Earthscan, p. 181-182. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1080/0969160X.2011.593864>.

EJAIRU, U.; ADERAMO, A. T.; OLISAKWE, H. C.; ESIRI, A. E.; ADANMA, U. M.; SOLOMON, N. O. Eco-friendly wastewater treatment technologies (concept): conceptualizing advanced, sustainable wastewater treatment designs for industrial and municipal applications. **Clean and Renewable Research and Environmental Technologies**, v. 2, n. 1, p. 083–104, 2024. DOI: <https://doi.org/10.57219/crret.2024.2.1.0063>.

FALKENMARK, M.; ROCKSTRÖM, J. **Balancing water for humans and nature**. London: Routledge, 2006.

FARIAS, C. H.; FERNANDES, P. D.; DANTAS NETO, J.; GHEYI, H. R. Eficiência no uso da água na cana-de-açúcar sob diferentes lâminas de irrigação e níveis de zinco no litoral paraibano. **Engenharia Agrícola**, v. 28, p. 494-506, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162008000300010>.

FLORIDES, F.; GIANNAKOUDI, M.; IOANNOU, G.; LAZARIDOU, D.; LAMPRINIDOU, E.; LOUKOUTOS, N.; KATSOYIANNIS, I. A. Water reuse: a comprehensive review.

Environments, v. 11, n. 4, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/environments11040081>.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **FAOSTAT**, v. 403. Rome: FAO, 2018. Disponível em: <http://faostat.fao.org>.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **The state of the world's water resources for food and agriculture: managing water in the agriculture sector**. Rome: FAO, 2021.

GARRIDO, A.; REY, D.; CALATRAVA, J. Water markets in the context of climate change. **Water Resources Research**, v. 56, n. 2, p. e2019WR025043, 2020.

GUYMAN, E. **XPRIZE water scarcity**. 2024. DOI: <https://doi.org/10.52843/cassyni.cyjbpi>.

JIANG, A. Z.; MCBEAN, E. A.; WANG, Y. A sustainable environment requires sustainable water: a review of some water issues to learn from. **Environmental Reviews**, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1139/er-2024-0020>.

KOKKE, M. Brazilian's legal framework and water regulation. **Modern Management Forum**, v. 5, n. 4, 2023. DOI: <https://doi.org/10.30564/mmpp.v5i4.5819>.

LIU, H.; LIU, H.; LEI-HUA, G. Analysis of industrial water use efficiency based on SFA–Tobit panel model in China. **Sustainability**, v. 16, n. 19, p. 8708, 2024 a. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16198708>.

MAJESKI, J. C. L.; TRINDADE, L. DE L. Lacunas de governança da água nas bacias hidrográficas da Vertente Atlântica do Estado de Santa Catarina **Eng. Sanit. Ambient.**, v. 28, e20220231, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220220231>

MARTINS, R. O; VASCONCELOS, C.; RODRIGUES, K. S.; POZZOBOM, U. M.; BRASIL, L. SCondition index for Cerrado springs: a simplified and efficient tool for conservation planning. **Water Biology and Security**, v. 4, n. 2, 1 abr. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watbs.2024.100336>

MEDIATY, M.; RANTE, M. I.; HABBE, A. H. World controversy: water sustainability in an environmental accounting perspective. **Deleted Journal**, v. 2, n. 4, p. 600–609, 2024. DOI: <https://doi.org/10.46799/adv.v2i4.224>

MESKELU, E. Improving water productivity in irrigated agriculture: a review of techniques and water conservation methods in Ethiopia. **Global Academic Journal of Agriculture and Biosciences**, v. 6, n. 5, p. 138–153, 2024. DOI: <https://doi.org/10.36348/gajab.2024.v06i05.005>

MEZILOV, G.; ANNAMURADOV, D.; HOJAGULYYEV, P.; GURBANOVA, A.; GEDAYEV, S.; ORAZOV, Y. Sustainable water management practices at ETUT: innovations and

policies. **Journal of Sustainability Perspectives**, v. 4, p. 556–571, 2024. DOI: <https://doi.org/10.14710/jsp.2024.25197>.

MIALYK, O.; BOOIJ, M. J.; SCHYNS, J. F.; BERGER, M. Evolution of global water footprints of crop production in 1990–2019. **Environmental Research Letters**, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad78e9>.

MIRANDA, F. R.; ROCHA, A. B. S.; GUIMARÃES, V. B.; DA SILVA, E. S., LIMA; G. D. C. M.; SANTOS, M. M. S. Eficiência do uso da água na irrigação do coqueiro anão. **Irriga**, v. 24, n. 1, p. 109–124, 2019. DOI: <https://doi.org/10.15809/irriga.2019v24n1p109-124>.

MIZYED, A.; MOGHIER, Y.; HAMADA, M. Employing the agricultural water footprint concept to enhance the sustainable management of water resources: a review. **Water Practice & Technology**, 2024. DOI: <https://doi.org/10.2166/wpt.2024.274>.

MONTEIRO, R. O. C.; COSTA, R. N. T.; LEÃO, M. C. S.; DE AGUIAR, J. V. Eficiência do uso da água e nitrogênio na produção de melão. **Irriga**, v. 13, n. 3, p. 367–377, 2008. DOI: <https://doi.org/10.15809/irriga.2008v13n3p367-377>.

MONTOYA, M. A. A pegada hídrica da economia brasileira e a balança comercial de água virtual: uma análise insumo-produto. **Estudos Avançados**, v. 24, n. 2, 2020. DOI: <https://doi.org/10.11606/1980-5330/ea167721>.

MORAES, M. M. G. A.; SILVA, G. N. S.; CUNHA, M. P.; DIAS, N. B. M.; CARDOSO, T. F.; GUILHOTO, J. J. M.; CANDIDO, L. A.; SANTOS, R. R. S. Integration of a network-based and an economy-wide water model to support decision making on water resources planning and management in northeastern Brazil. **Frontiers in Water**, v. 3, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.681723>.

PICOLI, I. T. **Pegada hídrica da economia brasileira**: uma análise de insumo-produto. 2016. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Econômico) - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Economia, Campinas, 2016. DOI: <https://doi.org/10.47749/T/UNICAMP.2016.969253>.

RODRIGUES, S.; PEITER, M. X.; ROBAIANA, A. D.; BRUNING, J.; FERREIRA, L. D.; CHAIBEN NETO, M. Different water availability in the economic water productivity in soybean cultivars. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 70, n. 1, p. 1–10, jan./fev. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/0034-737X202370010001>.

SALA-GARRIDO, R.; MOCHOLI-ARCE, M.; MOLINOS-SENANTE, M.; MAZIOTIS, A. Eco-efficiency assessment under natural and managerial disposability: an empirical application for Chilean water companies. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 2, p. 3222–3234, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22400-6>.

SANTOS, F.; BORGES, L. A. C.; SILVA, D. Analysis of granting and registration data from the watershed of the tributaries of the Upper São Francisco River – SF1, contained in the IDE-SISEMA. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 19, n. 1, e010856, 2025. DOI: <https://doi.org/10.24857/rgsa.v19n1-067>.

SCHMITZ, A. P.; BITTENCOURT, M. V. L. Crescimento econômico e pressão sobre recursos hídricos. **Estudos Econômicos (São Paulo)**, v. 47, n. 2, p. 329-363, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/0101-416147243asm>.

SILVA, T. G. F.; MOURA, M. S. B.; ZOLNIER, S.; SORAES, J. M.; VIEIRA, V. J. S.; GOMES JÚNIOR, W. F. Demanda hídrica e eficiência do uso de água da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 12, p. 1257-1265, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011001200007>.

VISENTIN, J. C.; SZIGETHY, L. **TD 2731 - Inovação tecnológica e sustentabilidade da cadeia de produção: um exercício para a água no Brasil**. Texto para Discussão / Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Brasília: Rio de Janeiro: Ipea, 2022.

ZAHEDI, R.; ASLANI, A.; YOUSEFI, H.; NOOROLLAHI, Y.; ASTARAEI, F. R. Water, energy, food, and environment nexus for achieving sustainable transition, addressing gaps, and implementing solutions for global and Iranian cases. **Energy Science & Engineering**, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/ese3.1950>.

ZHOU, W.; DONG, J.; ZHAO, Q.; LI, Q. Discussion on influencing factors of water resources environment and strategies for protecting water ecology. **Journal of World Architecture**, v. 8, n. 5, p. 36-41, 2024. DOI: <https://doi.org/10.26689/jwa.v8i5.8743>.