

Reúso industrial de efluente na gestão integrada de águas urbanas

RESUMO

Patricia Bilotta

pb.bilott@gmail.com

Mestre e doutora em Engenharia Hidráulica e Saneamento, especialista em Projetos Sustentáveis e de Mitigação das Mudanças Climáticas. Professora Titular do PPGDL-UNISUAM. Curitiba, Brasil.

Cristiane Mansur de Moraes

Souza

arqcmansur@gmail.com

Arquiteta e urbanista, mestre em Desenho Urbano e doutora em Ciências Humanas. Professora Titular do PPGDR-FURB. Blumenau, Brasil.

Patrícia Dornelles de Aguiar

patidornelles.aguiar@gmail.com

Economista, mestre em Desenvolvimento Regional. Pesquisadora na FURBE. Blumenau, Brasil.

Carlos Alberto Cioce Sampaio

carlos.cioce@gmail.com

Administrador, mestre e doutor em Planejamento e Gestão Organizacional para o Desenvolvimento Sustentável. Professor titular no PPGDR- FIRB, PPG Ciências ambientais-UNISUL/Instituto Ânima-IA, PPG Governança e Sustentabilidade- ISAE. Curitiba, Brasil.

O objetivo deste trabalho é a análise integrada do reúso industrial de efluente na perspectiva de três dimensões: i) demanda hídrica do setor industrial e urbano; ii) PIB industrial; iii) produção científica brasileira relatada sobre o tema. Esta é uma pesquisa qualitativa e quantitativa com dados secundários das bases da Agência Nacional de Águas, da Confederação Nacional da Indústria e da plataforma *Web of Science*. Os dados foram reclassificados e aplicou-se álgebra de mapas para integração espacial das variáveis. Os maiores destaques territoriais foram: São Paulo, Minas Gerais, Rio de Janeiro, Paraná, Rio Grande do Sul, Bahia e Pernambuco (alto consumo e PIB industrial). Os casos representativos no Brasil ilustram oportunidades e desafios de plantas industriais ao revelar suas particularidades. Este estudo pode apoiar a gestão integrada de águas urbanas e auxiliar a orientação de recursos para regiões prioritárias.

PALAVRAS-CHAVE: Reciclagem de efluente. Águas residuais. Eficiência hídrica. Gestão hídrica. Recuperação de água.

INTRODUÇÃO

Um estudo realizado pela *Water Resource Group*, que reúne grandes instituições de diferentes segmentos econômicos em prol da segurança hídrica mundial, estimou que o consumo de água no planeta deve passar de 4,5 bilhões de $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ para 6,9 bilhões $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ até 2030, caso o crescimento econômico e o modelo de produção se mantiverem o mesmo. Isso significa cerca de 40% acima da oferta hídrica mundial e sugere uma crise sem precedentes para os múltiplos usos da água (2030 WATER RESEARCH GROUP, 2009).

As condições desfavoráveis entre oferta e demanda hídrica e a degradação ambiental, sobretudo em áreas urbanas, reforçam a urgência de soluções apropriadas. Como fator agravante, os efeitos das mudanças do clima e da urbanização recaem sobre o sistema hidrológico, causando irregularidade na distribuição e ocorrência de chuvas e na quantidade de água disponível (MOURATIADOU *et al.*, 2016). Os mecanismos de adaptação devem promover o uso eficiente da água, a fim de assegurar o suprimento das demandas atuais e futuras (BILOTTA *et al.*, 2019).

Em 2015, a cúpula das Nações Unidas elaborou uma agenda com 17 objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) a serem alcançados até 2030. Dentre os ODS, está o objetivo 6, com o tema “água potável e saneamento” para “assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todos” (ONU, 2015). Promover o uso eficiente dos recursos hídricos vem também ao encontro dos ODS, à medida em que busca assegurar o manejo sustentável da água doce.

No contexto urbano, o setor industrial é um grande consumidor de água. Em 2017, a Agência Nacional de Águas publicou um relatório em que consta uma estimativa de retirada de $189,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ de água doce pelo setor industrial no território nacional (isto é, 38,1% da demanda hídrica urbana nacional) (ANA, 2019a). Esse consumo destinou-se ao abastecimento de 474.024 estabelecimentos industriais formais distribuídos em todo o país, sendo que 49,6% deles se concentram nos estados de São Paulo (27,7%), Minas Gerais (12,4%) e Rio Grande do Sul (9,5%) (CNI, 2018).

Uma estimativa realizada pela Agência Nacional de Águas (ANA) mostrou que 3 segmentos responderam pela captação de 70% da água destinada ao abastecimento industrial: produtos alimentícios (40,5%); produção de petróleo e biocombustíveis (16,1%); e papel e celulose (13,4%). A metodologia de cálculo da ANA considera o número de empregados da atividade industrial e o coeficiente de consumo de água correspondente ao código da Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE) em que a empresa se enquadra (ANA, 2017). Esse método é robusto e recentemente foi aplicado em um trabalho de prospecção do potencial de reúso de efluente na região de Curitiba, para cerca de 1.000 indústrias (MACHADO *et al.*, 2020).

O estresse hídrico pode parecer desfavorável para o setor industrial, porém, na verdade, se trata de uma oportunidade ímpar para estimular a adoção de práticas mais eficientes de produção (minimização do desperdício e uso de tecnologias com menor pegada hídrica), cujo impacto direto é a redução de custos operacionais e o aumento da competitividade da empresa (WILCOX *et al.* 2016). Assim, o setor industrial gradualmente toma consciência do seu papel na consolidação de um novo modelo de produção, mais alinhado com as necessidades e as limitações dos recursos naturais (MOSCOSO, 2018).

Dentre as alternativas de gestão sustentável da água no processo produtivo está a reciclagem de efluente, que favorece a recuperação do investimento da empresa em sistemas de tratamento, pois promove a reutilização planejada da água (BILOTTA *et al.*,

2019) e contribui para o equilíbrio socioambiental do sistema hidrológico urbano (amplia a oferta da água aos usos múltiplos e reduz o descarte de poluentes nos cursos d'água) (UNESCO/WWAP, 2017). Essa prática está alinhada aos princípios da economia circular, pois promove o aproveitamento de subprodutos de atividades industriais como fonte de matéria prima para novos processos (FATIMAH *et al.*, 2020).

Dentre os fatores que influenciam na implantação do reúso estão: a vazão de efluente (usuários de pequeno porte são menos beneficiados com a redução do consumo de água) (FERES *et al.*, 2015); o valor cobrado pelo uso da água e descarte de efluente (quanto maior a taxa, maior será o interesse do usuário pelo reúso) (DEMAJOROVIC *et al.*, 2015); o valor do investimento em tecnologias de tratamento do efluente para atender a demanda de qualidade do reúso pretendido (altos investimentos reduzem a atratividade) (FERES *et al.*, 2015).

A incidência de tarifas progressivamente mais expressivas sobre o volume de águas residuais descartadas em corpos hídricos e a aplicação de critérios mais restritivos para a captação direta (por exemplo, exigência de uso parcial de fontes alternativas de água conforme a vazão consumida ou a tipologia industrial), podem estimular a reciclagem. Paralelamente, incentivos financeiros e fiscais são necessários para assegurar sua viabilidade econômica (WILCOX *et al.*, 2016; DEMAJOROVIC *et al.*, 2015; FERES *et al.*, 2015).

O objetivo deste trabalho é realizar uma análise integrada do reúso industrial de efluente sob a perspectiva de três dimensões: i) a demanda hídrica do setor industrial e urbano; ii) o PIB industrial dos estados; iii) a produção científica brasileira relatada em artigos publicados sobre o tema.

Os recursos de geoprocessamento, utilizados nesta pesquisa, são importantes ferramentas de apoio na gestão dos recursos hídricos e consistem no processamento sistemático de informações que descrevem características e comportamentos de um fenômeno que se deseja compreender em um espaço geográfico e intervalo de tempo (STEVOVIC & NESTORIVIC, 2016).

METODOLOGIA

Esta é uma pesquisa exploratória, descritiva, delimitada espacialmente ao território brasileiro, e utiliza dados secundários (qualitativos e quantitativos).

Levantamento de estudos

Os estudos brasileiros publicados sobre reúso industrial de efluente foram localizados em consulta à plataforma *Web of Science*, utilizando-se lógica *booleana*. Adotou-se essa ferramenta por ser um sistema internacional de classificação de produção científica amplamente utilizado pelo meio acadêmico para analisar a comunicação do conhecimento científico e a predição de tendências de pesquisa (ZHAO *et al.*, 2020; WANG & WALTMAN, 2016).

Os critérios de seleção foram: a) aparição dos termos de busca no título, ou palavras-chave, ou resumo (*reuse AND effluent AND industrial*; ou *recycling AND effluent AND industrial*; ou *“water reuse” AND industrial*; ou *reuso AND efluente AND industrial*; ou *reciclagem AND efluente AND industrial*, ou *“reuso de água” AND industrial*); b) todas as áreas de pesquisa da *Web of Science*; c) instituições brasileiras de ensino ou pesquisa. Os estudos publicados que atenderam simultaneamente todos esses critérios foram

selecionados para a pesquisa. O termo *wastewater* foi excluído, pois na absoluta maioria dos casos os autores o utilizam quando se referem ao esgoto doméstico.

Os estudos selecionados foram submetidos a leitura para identificar a localização geográfica (escala municipal) das respectivas instituições de ensino ou de pesquisa. Cada estudo foi identificado espacialmente uma única vez, admitindo-se o mesmo local da instituição de vínculo dos autores, ou do autor principal quando mais de uma instituição estava envolvida no trabalho. Optou-se por esse delineamento pois o foco deste trabalho é analisar a participação das instituições na produção do conhecimento. Essas informações foram compiladas e georeferenciadas, resultando em um arquivo *csv* posteriormente inserido no *software* QGis (versão 3.10.1) como camada vetorial (pontos) - cada ponto corresponde a um estudo publicado. Sobre essa camada de dados foi aplicado o recurso de mapa de calor para determinar a densidade de ocorrência dos estudos.

Demanda hídrica industrial

O inventário de consumo de água nas indústrias foi obtido em consulta à base de meta-dados da ANA. Os dados foram estruturados em um arquivo *csv*, com recorte para o território nacional e detalhamento em escala estadual, com base nos dados de 2015 - último relatório (ANA, 2015a). Fazem parte do banco de dados os estabelecimentos formais registrados como indústria de transformação (CNAE 2.0 - seção C), que incluem atividades de fabricação de alimentos, produtos têxteis, celulose e papel, combustíveis e biocombustíveis, químicos, fármacos, plástico e borracha, metalurgia, eletrônicos e máquinas, móveis, entre outros (ANA, 2017).

Demanda hídrica urbana

Utilizou-se dados da plataforma Atlas do Abastecimento Urbano da ANA sobre o consumo estadual de água para atividades urbanas (ANA, 2015b) e subtraiu-se dos valores obtidos o consumo hídrico industrial. As informações foram compiladas em um arquivo *csv* e georeferenciadas, vinculando-se os dados com os respectivos códigos de registro estadual do IBGE (denominados GEOCOD).

Participação do PIB industrial

A contribuição das indústrias no PIB estadual (milhões de R\$) foi determinada por meio de consulta ao portal da Confederação Nacional da Indústria (CNI). Os dados se referem ao ano de 2018 - último relatório da CNI (CNI, 2018). As informações coletadas foram compiladas em um arquivo *csv* e georeferenciadas, vinculando-se os dados com os respectivos GEOCOD de cada estado.

Análise espacial dos dados

Os dados coletados (itens anteriores) foram reclassificados no intervalo 1 a 10, por percentis, e álgebra de mapas foi aplicada na análise espacial integrada das variáveis demanda industrial (D_i), demanda urbana (D_u) e PIB industrial (Q_i), admitindo-se pesos iguais ($p_1 = p_2 = p_3$) (equação 1). Quanto maior o índice resultante, maior o destaque.

$$\text{Destaque territorial} = D_i \cdot p_1 + D_u \cdot p_2 + Q_i \cdot p_3 \quad (\text{equação 1})$$

A metodologia utilizada nesta pesquisa se baseia no estudo realizado por Nóbrega *et al.* (2018), em que os autores propõem uma análise espacial para qualificar a inserção social de Programas de Pós-Graduação (PPGs) da área de Ciências Ambientais (CiAmb). O modelo consistiu na construção de um índice de destaque territorial dos PPGs (escala entre 0 e 10) a partir da integração de três componentes de abrangência municipal (índice de vulnerabilidade socioeconômica, índice hemerobia, densidade geográfica dos PPG) e aplicação de álgebra de mapas. O modelo de Nóbrega *et al.* (2018) se mostrou bastante robusto e adequado para utilização neste trabalho.

Levantamento de casos representativos

Os estudos publicados foram submetidos a análise de conteúdo e consistiu na leitura e seleção daqueles trabalhos que relatavam no texto simultaneamente: 1) tipologia industrial; 2) tipologia de reúso; 3) tecnologias utilizadas (tratamento, transporte, outros); 4) capacidade de redução do consumo de água; 5) desafios para a implantação do reúso em escala industrial. Essas informações foram extraídas dos textos, compiladas e apresentadas na forma de casos representativos dos estudos sobre reúso industrial de efluente no Brasil.

DESENVOLVIMENTO (RESULTADOS E DISCUSSÕES)

Estudos publicados sobre reúso

As informações da *Web of Science* mostraram 219 estudos brasileiros publicados até o início de 2020 sobre reúso industrial de efluente (quarto lugar no *ranking* mundial). A China está em primeiro lugar (347 artigos), seguida pelos EUA (278 artigos) e a Índia (233 artigos) (total geral de 2.760 publicações).

Os primeiros estudos brasileiros ocorreram no ano de 1999, na cidade de Porto Alegre/RS e São Paulo/SP, e há uma tendência ascendente na publicação de estudos sobre o assunto nos últimos cinco anos (2015-2019), em comparação ao período entre 2005-2009 (Figura 1). Esse aumento pode estar relacionado à evolução das tecnologias de pós-tratamento de efluentes nas últimas 2 décadas (ZHAO *et al.*, 2020), que viabilizam a adequação da qualidade do efluente para usos múltiplos, e, ao mesmo tempo, o aumento da demanda hídrica urbana, pela industrialização e crescimento populacional, bem como a redução da oferta hídrica com a poluição de cursos d'água (MÜLLER *et al.*, 2020).

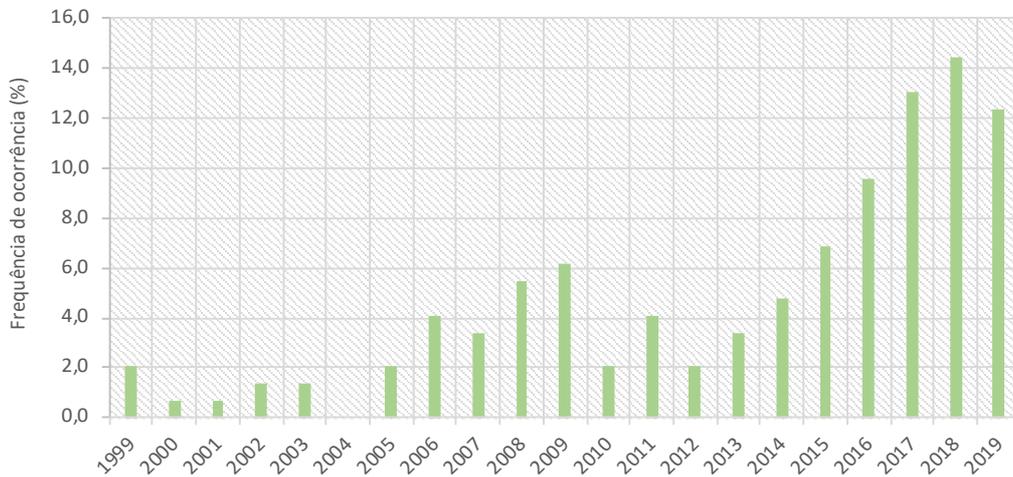


Figura 1. Série temporal dos estudos brasileiros publicados.

O CNPq e a Capes são os principais agentes financiadores das produções (61,47%), seguidos por agências estaduais, com destaque para a FAPEMIG (15%), a FAPESP (14%) e a FAPERGS (12%), e demais instituições federais, estaduais e privadas (19,72%) (Figura 2).

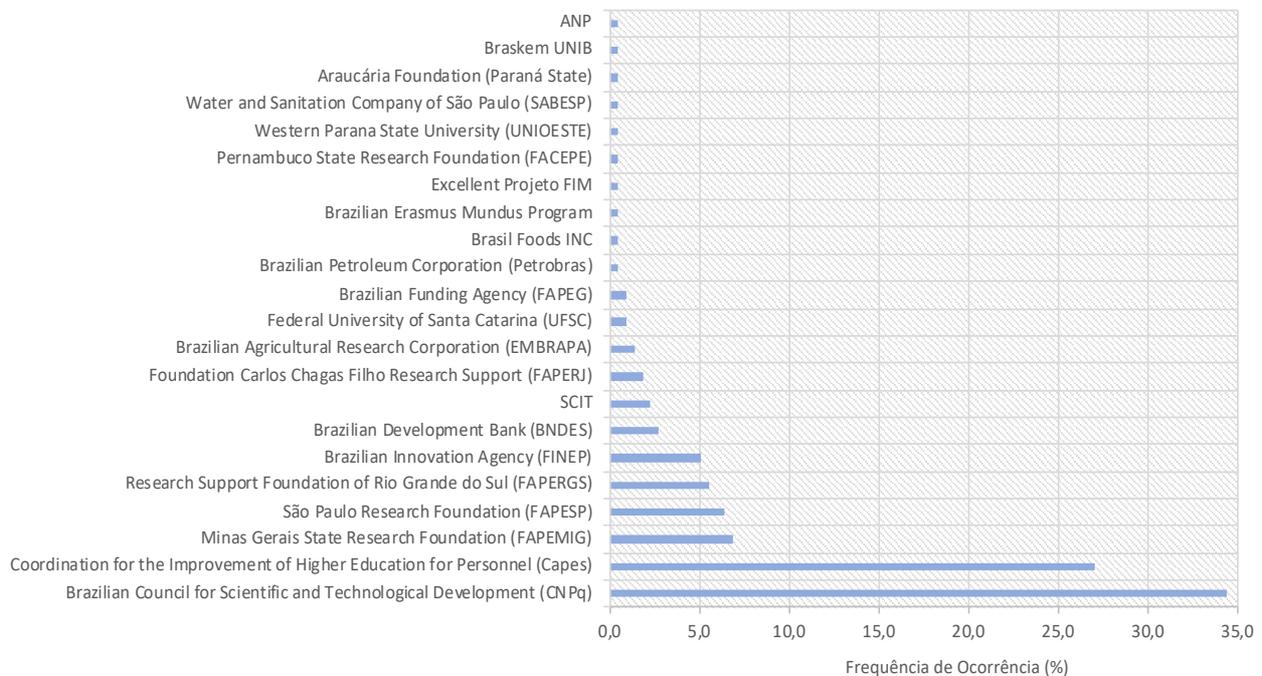


Figura 2. Agências de fomento das pesquisas brasileiras publicadas sobre o assunto.

Quando os dados de recurso das agências estaduais de fomento são confrontados com o consumo médio industrial de água (por estado) tem-se um descompasso no país. O Paraná, por exemplo, é o terceiro maior consumidor industrial de água (média 16,45 m³.s⁻¹) e apenas 1 estudo publicado recebeu recursos da agência de apoio à pesquisa no

estado. Não há registro na *Web of Science* de estudo publicado por pesquisadores de Alagoas, embora seja o quarto no *ranking* de maior retirada hídrica industrial. Porém, pode haver pesquisas que não resultaram em publicações e esses trabalhos não foram computados. Por isso, a divulgação da produção científica vinculada a projetos de pesquisa é tão importante e fortemente recomendada, principalmente nos casos de recursos provenientes de fontes federais, estaduais e municipais.

A abertura de editais estaduais de apoio a linhas de pesquisa sobre reúso de efluente pode contribuir para a mudança desse cenário a médio prazo, já que se trata de um tema de interesse público. Editais destinados à gestão integrada de águas urbanas, sobretudo em regiões metropolitanas, podem prever o desenvolvimento de soluções combinadas, como o reúso de efluente de estação de tratamento de esgoto sanitário para atender demandas específicas do setor industrial, principalmente para empresas hidroativas.

As informações da *Web of Science* revelaram também que apenas 12,80% das publicações brasileiras se concentram na categoria “*Water Resources*”, enquanto a maior parte (54,57%) está enquadrada nas áreas de “*Environmental Science Ecology*” e “*Engineering*” (Figura 3). As maiores ocorrências compreendem as áreas de *Engenharia*, *Multidisciplinar* e *Ciências Biológicas*. Segundo a classificação da Capes (CAPES, 2019), essas áreas são consideradas ciências eminentemente aplicadas.

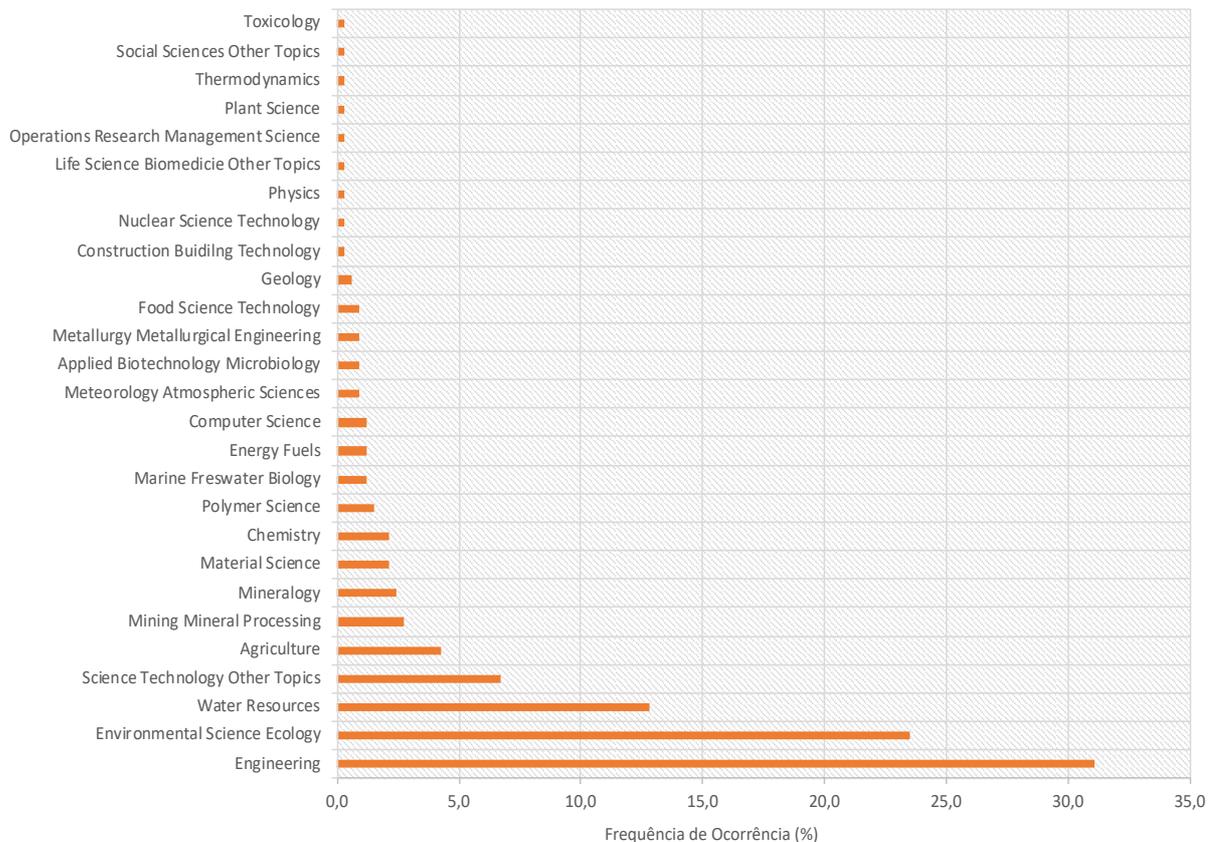


Figura 3. *Ranking* dos estudos brasileiros publicados por área do conhecimento.

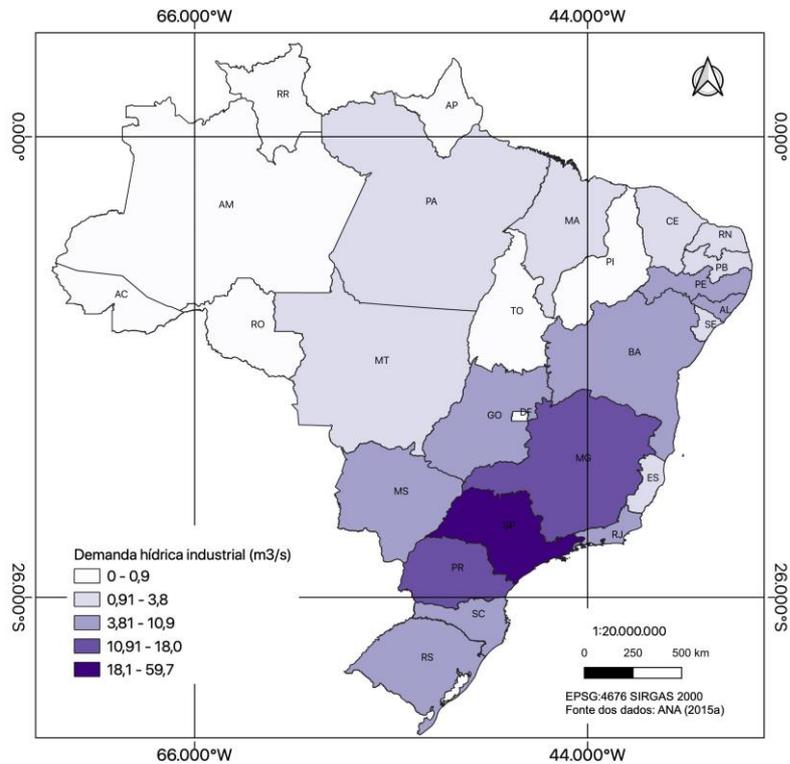
Esses resultados podem indicar que as pesquisas sobre reúso industrial de efluente no Brasil têm seu foco principalmente voltado à manutenção e ao controle da qualidade

ambiental, pois o manejo adequado do efluente industrial contribui para a redução da poluição nos corpos hídricos superficiais e subterrâneos (BARRETO *et al.*, 2020; NEDEAU *et al.*, 2003). Diante disso, há indícios para se acreditar que o reúso de efluente não é ainda considerado uma estratégia para o enfretamento do estresse hídrico urbano e adaptação às mudanças climáticas. Isso reforça a importância de editais de fomento à pesquisa sobre essa temática, assim como a necessidade de formulação de legislação que oriente as práticas de reúso para assegurar a saúde pública e garantir a disponibilidade hídrica para o setor industrial.

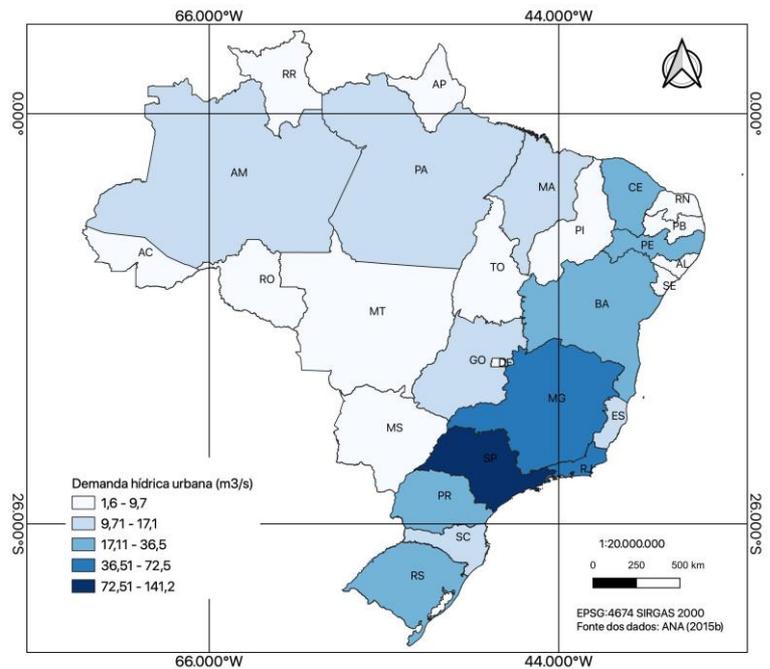
O mapa de destaque territorial na temática do reúso de efluente pode auxiliar na orientação de recursos para regiões prioritárias. Nesse caso, recomenda-se a utilização de dados em escala municipal, coletados junto aos órgãos reguladores de outorgas de captação de água e empresas prestadoras de serviços de fornecimento de água potável por redes de abastecimento.

Destaque territorial

Segundo os dados da ANA, no ano de 2015, as maiores retiradas de água para consumo industrial ocorreram nos estados de São Paulo (59,71 m³.s⁻¹; 121.392 indústrias), Minas Gerais (17,95 m³.s⁻¹; 58.673 indústrias) e Paraná (16,45 m³.s⁻¹; 41.603 indústrias) - juntas elas representam 48,8% da captação industrial nacional, como mostra a Figura 4a. As demandas urbanas mais hidroativas foram registradas no estado de São Paulo (141,2 m³.s⁻¹), Rio de Janeiro (72,5 m³.s⁻¹) e Minas Gerais (50,5 m³.s⁻¹) - somam 46,3% do consumo urbano nacional (Figura 4b). Isso indica que cerca de 42% da captação de água em São Paulo se destina a atividades industriais e 35% em Minas Gerais. Portanto, o reúso de efluente deve ser estimulado nesses estados para atender a demanda industrial e garantir a oferta hídrica para os demais usos múltiplos.



a. Demanda industrial em 2015.



b. Demanda urbana em 2015.

Figura 4. Demanda hídrica nos estados brasileiros por tipo de atividade.

As indústrias mais hidroativas foram os fabricantes de produtos alimentícios, bebidas, papel e celulose, derivados de petróleo e biocombustíveis, substâncias químicas e metalurgia - somam 85% de toda a vazão nacional de água retirada para abastecer o setor industrial (ANA, 2017). Portanto, esses são segmentos prioritários para a implantação de práticas de reciclagem de efluente.

O reúso de efluente em torres de resfriamento aparece em vários estudos publicados para diferentes tipologias industriais. Essas unidades operacionais são muito comuns em diversas atividades industriais e possuem grande potencial para o reúso de efluente. Andrade *et al.* (2017) realizaram um estudo de caso em indústria farmacêutica, na cidade do Rio de Janeiro, e estimaram consumo evitado de água em $65 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ com a implantação do reúso de efluente para abastecer a torre de resfriamento e a caldeira de uma única empresa. Em outro estudo, Pohl & Lenz (2017) contabilizaram a capacidade de redução de cerca de 40% da demanda hídrica de uma indústria automotiva, na cidade de Gravataí (RS), com a substituição de água por efluente na alimentação da torre de resfriamento da empresa. Os estudos também têm recomendado o reúso de efluente em etapas de lavagem de materiais na linha de produção e na limpeza de pátios, como mostram os trabalhos realizados por Souza *et al.* (2016), no Rio Grande do Sul, e Odppes *et al.* (2018), em Curitiba. Os autores estimaram o potencial de redução do consumo de água em 80% em uma indústria têxtil e 61% em uma indústria de fabricação de concreto, respectivamente.

A Figura 5 apresenta a relação entre o desempenho econômico do setor industrial brasileiro, para a produção de bens e serviços (PIB), e o consumo de água. Os valores são expressos em milhões de R\$ por m^3 de água retirada para abastecer indústrias. Alguns estados da região norte (AL, PA, PE, SE) e centro-oeste (GO, MG) se enquadraram na faixa de menor PIB por m^3 de água. Os estados de São Paulo e Minas Gerais se destacam no PIB industrial nacional (R\$ 378.709,90 e R\$ 128.376,60), porém concentram as maiores demandas hídricas (Figura 4) e estão entre os estados com baixa relação PIB industrial/ m^3 de água retirada (R\$ 6.343,00. m^{-3} e R\$ 7.150,70. m^{-3}). Assim, essas regiões são prioritárias para a implantação de estratégias de estímulo ao reúso industrial de efluente, como será discutido a diante.

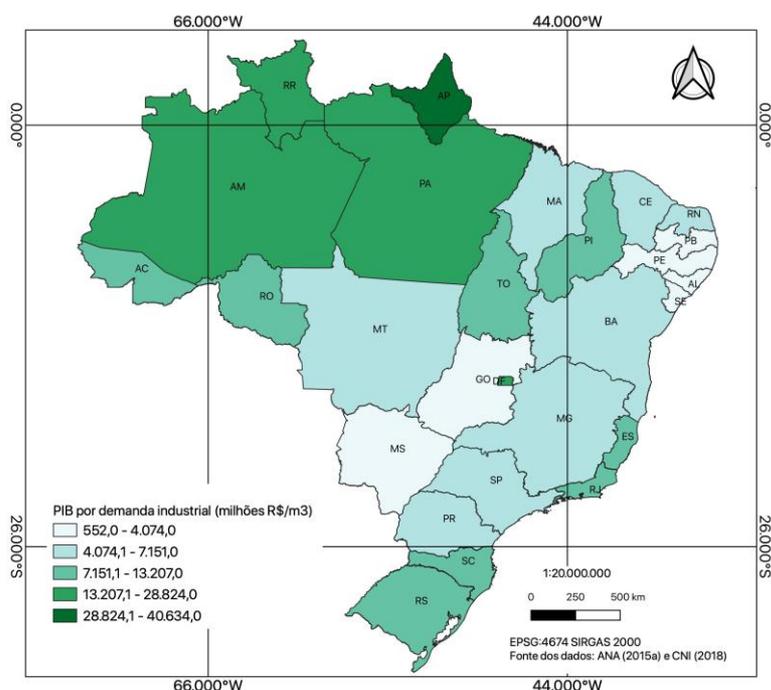


Figura 5. Indicador de desempenho econômico industrial em relação ao consumo de água.

A demanda hídrica por unidade de produção está diretamente relacionada ao tipo de atividade (Tabela 1), assim como a política de atualização da tecnologia utilizada no processo de fabricação e a capacidade de gestão dos recursos da empresa (matérias primas e funcionários). Portanto, os estudos de caso são fortemente recomendados, pois as informações indicam com mais precisão o potencial de recuperação do efluente em cada segmento industrial.

Tabela 1. Coeficiente de retirada de água por tipologia industrial.

Segmento	Coeficiente (L.empregado ⁻¹ .dia ⁻¹)
Alimentos, bebidas e fumo	150 - 16.490
Têxtil, vestuário, couro	1.895 - 3.086
Madeira, papel e celulose	155 - 107.683
Petróleo e biocombustíveis	1.611 - 20.409
Químicos	362 - 16.687
Farmacêuticos	146 - 1.257
Metalurgia	164 - 19.600

Fonte: Adaptado de ANA (2017).

A Figura 6 mostra o resultado da análise espacial integrada das variáveis (demanda hídrica industrial e urbana e PIB industrial), e apresenta a densidade de ocorrência dos estudos. Quanto maior o valor do índice, maior o destaque territorial. Os pontos em vermelho indicam a localização espacial das instituições que produziram os estudos identificados na plataforma *Web of Web*.

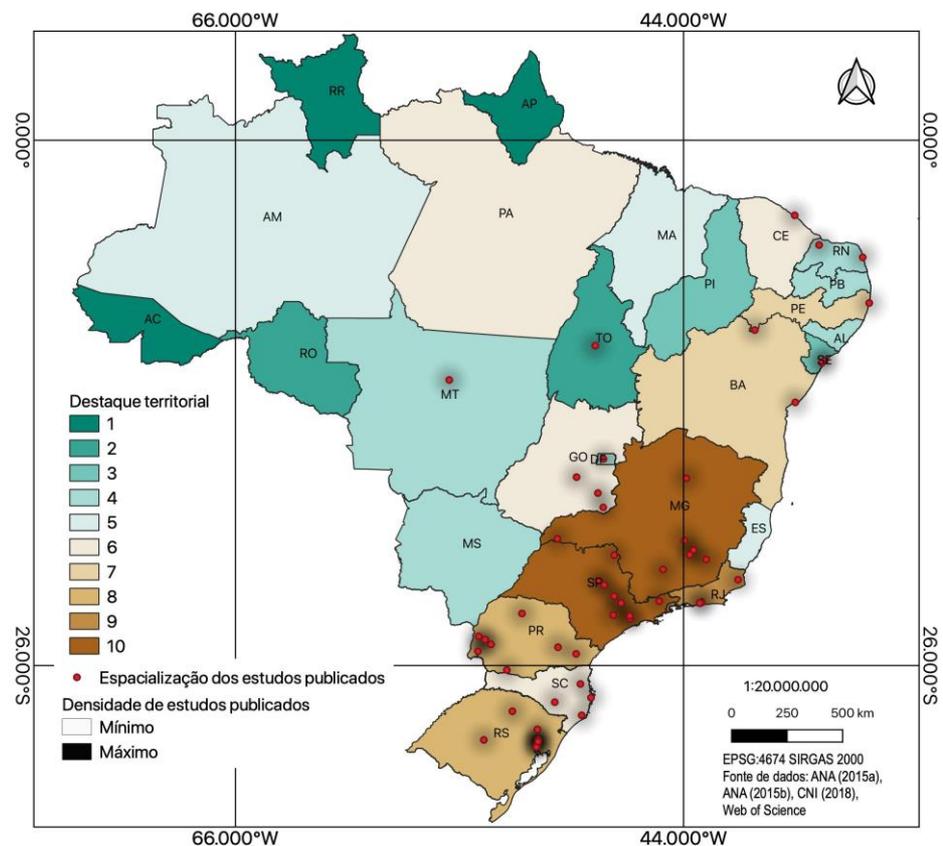


Figura 6. Mapa de destaque territorial e espacialização dos estudos publicados.

A integração das três variáveis revelou que os maiores destaques são SP e MG, seguido por RJ, PR, RS, BA e PE. Essas regiões concentram alto consumo de água em áreas urbanas e se sobressaem no desempenho econômico industrial. Portanto, práticas de reciclagem de efluente são fortemente recomendadas nessas regiões como medida para atender a demanda crescente dos usos múltiplos.

Na integração dos mapas não foi inserida a variável que descreve a oferta hídrica dos estados, pois a pesquisa delimitou-se ao entendimento da demanda nas áreas urbanas e a participação do setor industrial no consumo. Esforços futuros podem ampliar o escopo deste trabalho para incluir dados de oferta hídrica, como vazão dos rios e aquíferos, por trecho, e aspectos geofísicos das diferentes regiões, como zonas costeiras e mata atlântica.

O levantamento de estudos na *Web of Science* revelou os seguintes resultados, por estado: 22,37% RS; 17,81% SP; 14,16% RJ; 10,96% SC; 10,6% MG; nenhum estudo em AC, AL, AP, AM, ES, MA, MS, PA, PI, RO e RR. Tendo em vista que a aplicação dos resultados desses estudos se destina a soluções adaptadas para as necessidades de cada indústria, era esperado que os estados com maior demanda de água nos processos industriais (SP, PR e MG) fossem também aqueles com maior número de estudos de caso. Todavia, essa tendência não se confirmou. Essas informações podem auxiliar a estruturação de metas para desenvolver tecnologias de reúso em atividades de maior demanda hídrica.

As soluções tecnológicas, e mesmo gerenciais, para a implantação do reúso de efluente devem considerar todas as particularidades de cada planta industrial, isto é, a qualidade do efluente, o tipo de reúso, a infraestrutura pré-existente, o investimento necessário, a capacitação de recursos humanos para operar os sistemas de tratamento, entre outras (WILCOX *et al.*, 2016). Por essa razão, os estudos de caso são fortemente recomendados antes de sua implantação (HESPANHOL, 2008). Na prática alguns fatores impactam significativamente a decisão das empresas. Um dos pontos estratégicos é o valor cobrado pela água consumida e pelo efluente descartado (DEMAJOROVIC *et al.*, 2015), pois as empresas buscam soluções financeiramente rentáveis e que, ao menos tempo, minimizem custos operacionais e garantam sua capacidade de competitividade frente a seus concorrentes. Portanto, pressupõe-se que quanto maior o valor da cobrança pelo uso da água e descarte do efluente, maior será a atratividade no investimento em tecnologias de pós-tratamento e transporte do efluente (FERES *et al.*, 2015), em detrimento da utilização de uma fonte de água limpa.

A cobrança é prevista na Política Nacional dos Recursos Hídricos (PNRH) como instrumento de gestão e representa a remuneração de um bem público, cujo valor é fixado pelos Comitês de Bacias Hidrográficas com a participação de representantes de todos os segmentos (usuários, sociedade civil, poder público) (SOTTO *et al.*, 2019). Um exemplo de cobrança é o caso da bacia do Rio Paraíba do Sul (entre SP, RJ e MG), de domínio da união, onde o preço unitário da água foi definido em R\$ 0,0316 por m³ consumido e resultou na arrecadação de R\$ 1.842.056,00 em 2018 com apenas 1 dos 10 maiores consumidores pagadores, a Companhia Siderúrgica Nacional (ANA, 2019b).

A redução compulsória do consumo de água no processo produtivo (instrumento de comando e controle) também consiste em estratégia para promover o uso sustentável da água nas indústrias. Sua implementação deve ser prevista em lei e requer ampla discussão com representantes de todas as partes para a definição de limites e condições de redução do consumo (ANA, 2019b). Por fim, a combinação dos dois instrumentos de gestão (aplicação da cobrança e fixação de um limite de redução compulsória) pode contribuir de forma ainda mais satisfatória para o uso sustentável dos recursos hídricos (WILCOX *et al.*, 2016; DEMAJOROVIC *et al.*, 2015; FERES *et al.*, 2015).

O investimento em capacitação e infraestrutura de universidades e centros de pesquisa é um componente essencial para o aprimoramento de soluções que sejam viáveis e eficientes para o reúso industrial de efluente, apropriadas à realidade dos municípios brasileiros. A divulgação e transferência do conhecimento acadêmico para a sociedade é fundamental, em linguagem acessível, apropriada e eficaz, como agente de transformação dos meios de produção convencionais para sistemas mais eficientes.

Na gestão de águas urbanas, a reciclagem industrial de efluente tem sido compreendida como medida necessária e em contínua expansão em resposta às complexas relações existentes no ambiente hidrológico das cidades, as quais buscam soluções sustentáveis integradas para os sistemas de água potável, esgoto doméstico, efluentes industriais e águas pluviais (MAKROPOULOS & BUTLER, 2010). Assim, o reúso planejado de efluente é uma oportunidade para aumentar o estoque municipal de água com custo acessível e impactos ambientais e sociais positivos (NASIRI, *et al.*, 2013).

Casos representativos

A Tabela 2 resume estudos representativos do reúso industrial de efluente no Brasil. As pesquisas apontam as particularidades do reúso segundo a tipologia industrial.

Os casos mostram que o reúso pode substituir a água potável em diferentes etapas de produção de indústrias de transformação (limpeza de pátio, lavagem de peças, torre de resfriamento, caldeira, irrigação) e a importância da caracterização físico-química e biológica do efluente, considerando-se padrões de qualidade pré-estabelecidos (ex. NBR 13969/97) ou restrições impostas pelo próprio processo produtivo (especificação dos fabricantes dos equipamentos onde o efluente será utilizado).

Tabela 2. Casos representativos de publicações nacionais sobre o tema.

Indústria	Tipo de Reúso	Resultados	Local do Estudo	Referência
Concreteira	Limpeza do pátio utilizado na fabricação de estruturas de concreto	Redução de ~61% de água; investimento: R\$ 3.244,18	Curitiba/PR	Odppes <i>et al.</i> (2018)
Farmacêutica	Torre de resfriamento e caldeira	Redução de 24.000 m ³ .ano ⁻¹ de água; necessidade de pós-tratamento (osmose reversa); economia estimada R\$ 384 mil.ano ⁻¹	Rio de Janeiro/RJ	Andrade <i>et al.</i> (2017)
Automotiva	Torre de resfriamento	Redução de 40% de água; necessidade de pós-tratamento (filtro abrasador após lagoa de polimento)	Gravataí/RS	Pohl & Lenz (2017)
Alimentícia	Processamento de peixe	Necessidade de reduzir a quantidade de sólidos, compostos orgânicos e microrganismos para viabilizar o reúso	Palmas/TO	Ferraciolli <i>et al.</i> (2017)
Têxtil	Lavagem e higienização de tecidos em geral	Economia de ~80% de água	RS	Souza <i>et al.</i> (2016)
Têxtil	Lavagem de peças jeans	Vazão efluente: 20 m ³ .h ⁻¹ ; necessidade de pós-tratamento (alguns parâmetros de qualidade foram superiores aos limites aceitáveis: cor, turbidez, óleos de graxas)	Campos dos Goytacazes/RJ	Souza <i>et al.</i> (2013)
Têxtil	Fabricação de couro	Potencial para reúso direto	RS	Luersen <i>et al.</i> (2012)
Alimentícia	Irrigação de tomate	Melhoria na produtividade de tomate cereja (cultivo hidropônico); substituição de 25% de água	Recife/PE	Malheiros <i>et al.</i> (2012)

Alimentícia	Linha de produção, lavagem dos equipamentos e pisos, refeitório e banheiros	Potencial para reúso direto; necessidade de pós-tratamento (degradação fotoquímica de compostos orgânicos)	Lageado/RS	Marchini <i>et al.</i> (2011)
Metalmecânica	Não especificado	Necessidade de pós-tratamento (carvão ativado alcançou o melhor custo-benefício: US\$ 1,14.m ⁻³ tratado)	Curitiba/PR	Oenning Junior & Pawlowsky (2007)

A vazão de reúso também varia bastante de uma planta industrial para outra, dependendo do porte, da atividade, das tecnologias utilizadas no processo produtivo e sua eficiência (equipamentos mais modernos demandam menos água), das perdas no tratamento do efluente. Os custos reportados nos casos representativos compreendem, principalmente, a implantação de sistema de tratamento do efluente (quanto menor a alteração nas propriedades físicas, químicas e biológicas do efluente que alimenta, menor o custo para adequá-lo aos padrões de qualidade para reúso) e a infraestrutura de transporte do efluente dentro da planta industrial.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O mapa de destaque territorial proposto permitiu analisar de forma integrada as 4 variáveis investigadas neste trabalho (estudos publicados sobre o tema, demanda hídrica industrial e urbana, PIB industrial), como instrumento para auxiliar a gestão das águas urbanas. Quanto maior o índice resultante, maior o destaque territorial.

O levantamento de casos representativos do reúso industrial de efluente no Brasil permitiu identificar oportunidades e desafios da implantação dessa prática no processo de produção de uma planta industrial. A partir da análise desses casos concluiu-se que o reúso industrial de efluente envolve muitas particularidades, quanto ao tipo de tecnologia de tratamento, os usos pretendidos para o efluente, o investimento necessário e a vazão de água recuperada.

Recomenda-se identificar outras variáveis de interesse para refinar os resultados da pesquisa e desenvolver uma metodologia para qualificar os estudos publicados (por exemplo, comparação entre casos nacionais e internacionais, parcerias estabelecidas, desdobramentos dos estudos, impactos socioeconômicos, etc).

Enfatiza-se a importância de investimento em pesquisas sobre o tema, com a criação de editais de fomento, pois pressupõe-se que minimizar o consumo de água significa reduzir custos de produção e aumentar a competitividade empresarial, com benefícios diretos para a economia brasileira, e resulta em impacto positivo na dimensão socioambiental.

Industrial reuse of effluent in the integrated urban water management

ABSTRACT

The objective of this work is the integrated analysis of the industrial reuse of effluent in the perspective of three dimensions: i) water demand of the industrial and urban sector; ii) industrial GDP; iii) Brazilian scientific production reported on the topic. This is a qualitative and quantitative research with secondary data from the National Water Agency, the National Confederation of Industry and the Web of Science platform. Data were reclassified and map algebra was applied for spatial integration of variables. The main territorial highlights were: São Paulo, Minas Gerais, Rio de Janeiro, Paraná, Rio Grande do Sul, Bahia and Pernambuco (high consumption and industrial GDP). Representative cases in Brazil illustrate opportunities and challenges of industrial plants by revealing their particularities. This study can support integrated urban water management and help target resources to priority regions.

KEYWORDS: Effluent recycling. Wastewater. Water efficiency. Water management. Water recovery.

REFERÊNCIAS

- 2030 WATER RESEARCH GROUP. **Charting our water future: economic frameworks to inform decision-making.** Water Research Group, 2009. www.mckinsey.com/~media/mckinsey/dotcom/client_service/sustainability/pdfs/charting%20our%20water%20future/charting_our_water_future_full_report_.as_hx Acesso 10/10/2020.
- ANA, AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Demanda hídrica da indústria de transformação em 2015 - resultados por UF, municípios e tipologia industrial.** DF, 2015a. <https://metadados.ana.gov.br/geonetwork/srv/pt/main.home?uuid=c3cd1505-0a96-4b79-9604-4f69f8cec225> Acesso 26/10/2020.
- ANA, AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Atlas Brasil - Abastecimento urbano de água por estado.** DF, 2015b. <http://atlas.ana.gov.br/Atlas/forms/ResultadosEstado.aspx> Acesso 26/10/2020.
- ANA, AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Água na indústria: uso e coeficientes técnicos.** Brasília, DF, 2017. www.snirh.gov.br/portal/snirh/snirh-1/acesso-tematico/usos-da-agua/aguanaindustria_usoecoefficientestecnicos.pdf Acesso 26/10/2020.
- ANA, AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Manual de usos consultivos da água no Brasil.** Brasília, DF, 2019a. <http://biblioteca.ana.gov.br/index.html> Acesso 08/10/2020.
- ANA, AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Cobrança pelo uso dos recursos hídricos.** Brasília, DF, 2019b. <http://biblioteca.ana.gov.br/index.html> Acesso 01/10/2020.
- ANDRADE, B.A.S.; LACERDA, P.S.B.; OLIVEIRA, J.L.M. Viabilidade técnica de reúso de efluente gerado do sistema de osmose reversa em uma indústria farmacêutica. **Revista Ambiente e Água**, v. 12 (5), 2017, p. 694-707.
- BARRETO, S.; SOUZA, A.T.C.; MARTINS, C.C.; ARAUJO, S.B.L.; RIBEIRO, C.A.O. Urban effluents affect the early development stages of Brazilian fish species with implications for their population dynamics. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 188, 2020, p. 109907.
- BILOTTA, P.; AMARAL, K. J.; KUNZ, A. Práticas apropriadas para adaptação e mitigação das mudanças climáticas. In: Carlos Alberto Cioce Sampaio; Isabel Jurema Grimm; Liliane Cristine Schlemmer Alcântara; Oklinger Mantovaneli Jr. (Org.). **Ecosocioeconomia para promover territórios sustentáveis.** Ed. 1, Blumenau/SC: Editora FURB (Universidade Regional de Blumenau), v. 1, 2019, p. 59-84.
- CAPES, COORDENAÇÃO DE APERFEIÇOAMENTO DE PESSOAL DE NÍVEL SUPERIOR. **Tabela de áreas de conhecimento e avaliação da Capes**, 2017. www.capes.gov.br/images/documentos/documentos_diversos_2017/TabelaAreasConhecimento_072012_atualizada_2017_v2.pdf Acesso 09/10/2020.
- CNI, Confederação Nacional das Indústrias. Portal da Indústria: ranking dos estados brasileiros, 2020. <http://perfildaindustria.portaldaindustria.com.br/ranking?cat=3&id=2410> Acesso 07/08/2020.
- DEMAJOROVIC, J., CARUSO, C., JACOBI, P. R. Cobrança do uso da água e comportamento dos usuários industriais na bacia hidrográfica do Piracicaba, Capivari e Jundiaí. **Revista de Administração Pública**, Rio de Janeiro, v. 49, n. 5, set/out, 2015.
- FATIMAH, Y. A.; GOVINDAN, K.; MURNINGSIH, R.; SETIAWAN, A. Industry 4.0 based sustainable circular economy approach for smart waste management system

- to achieve sustainable development goals: a case study of Indonesia. **Journal of Cleaner Production**, v. 269, 2020, p. 122263.
- FERES, J., REYNAUD, A., THOMAS, A. **Water reuse in Brazilian manufacturing firms**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, Brasília, 2015.
- FERRACIOLLI, L.M.R.V.D.; LUIZ, D.B.; NAVAL, L.P. Potencial de reuso de efluente de indústrias de processamento de pescado. **Revista Ambiente e Água**, v. 12 (5), 2017, p.730-742.
- HESPANHOL, I. Um novo paradigma para a gestão de recursos hídricos. **Revista de Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, 2008, p. 131-157.
- LUERSEN, K.H.; SHULTZ, G.; STÜLP, S.; REMPEL, C. Reúso do efluente tratado na indústria curtidora. **Revista Tecnológica**, v. 16 (1), 2012, p. 05-10.
- MACHADO, C.H.; BILOTTA, P.; AMARAL, K.J. **Mapping the industrial water demand from Metropolitan Region of Curitiba (Brazil) for supporting the effluent reuse from wastewater treatment plants**. In: Walter Leal Filho, Paulo Borges de Brito, and Fernanda Frankenberger. (Org.). *International Business, Trade and Institutional Sustainability*. 1ed.Switzerland: Springer, v. 1, 2020, p. 899-914.
- MAKROPOULOS, C.; BUTLER, D. Distributed water infrastructure for sustainable communities. **Water Resources Management**, v. 24 (11), 2010, p. 2795–2816.
- MALHEIROS, S.M.M.; SILVA, E.F.F.; MEDEIROS, P.R.F.; PEDROSA, E.M.R.; ROLIM, M.M.; SANTOS, A.N. Cultivo hidropônico de tomate cereja utilizando-se efluente tratado de uma industria de sorvete. **Revista de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16 (10), 2012, p. 1085-1092.
- MARCHINI, A.E.; MACHADO, V.R.; STULP, S. Avaliação preliminar do potencial de reúso de efluente gerado em indústria de alimentos degradado por via fotoquímica. **Revista Tecnológica**, v. 15 (5), 2011, p. 67-72.
- MOSCOSO, R.O.A. La industria y sus efectos en el cambio climático Global. **Revista Científica de Investigación actualización del mundo de las Ciencias**, v. 2 (2), 2018, pp. 595-611. <<https://reciamuc.com/index.php/RECIAMUC/article/view/156>> Acesso 23/10/2020.
- MOURATIADOU, I., BIEWALD, A., PEHL, M., BONDSCH, M., BAUMSTARK, L., KLEIN, D. POPP, A., LUDERER, G., KRIEGLER, E. The impact of climate change mitigation on water demand for energy and food: An integrated analysis based on the Shared Socioeconomic Pathways. **Environmental Science & Policy**, v. 64, out, 2016.
- MULLER, A.; ÖSTERLUND, H.; MARSALEK, J.; VIKLANDER, M. The pollution conveyed by urban runoff: a review of sources. **Science of the Total Environment**, v. 709 (20), p. 125-136, 2020.
- NASIRI, F., SAVAGE, T., WANG, R. N., BARAWID, N., & ZIMMERMAN, J. B. A system dynamics approach for urban water reuse planning: a case study from the great lakes region. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 27 (3), 2013, p. 675–691.
- NEDEAU, E.J.;MERRITT, R.W.M.; KAUFMAN,M.G.K. The effect of an industrial effluent on an urban stream benthic community: water quality vs. habitat quality. **Environmental Pollution**, v. 123 (1), 2003, p. 1-13.
- NÓBREGA, R.A.A.; RIBEIRO, S.M.C.; COSTA, E.L.; BILOTTA, P.; GRIMM, I. J.; SAMPAIO, C.A.C.; SCHYPULA, A.; CHAVES, J.M.; ROCHA, W.J.S.F.; VASCONCELOS, R.N. Destaque territorial: proposta de modelagem socioeconômica e ambiental para avaliar inserção social nos programas de pós-graduação em ciências ambientais. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, v. (39), 2018, p. 34-50.

- ODPPES, R. J.; MICHALOVICZ, D. T.; BILOTTA, P. Reúso de água em indústria de fabricação de estruturas em concreto: uma estratégia de gestão ambiental. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 14 (34), 2018, p. 82-100.
- OENNING JUNIOR, A.; PAWLOWSKY, U. Avaliação de tecnologias avançadas para o reúso de água em indústria metal-mecânica. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.12 (3), 2007, p. 305-316.
- ONU, NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **Transformando nosso mundo: a agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável**. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/>> Acesso em: 13/10/2020.
- POHL, S.C.; LENZ, D.M. Utilização de efluente tratado em complexo industrial automotivo. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22 (3), 2017, p. 551-562.
- SOTTO, D.; RIBEIRO, D.G.; ABIKO, A. K.; SAMPAIO, C.A.C.; NAVAS, C.A.; MARINS K.R.C.; SOBRAL, M.C.M.; PHILIPPI JR., A.; BUCKERIDGE, M.S. Sustentabilidade urbana: dimensões conceituais e instrumentos legais de implementação. **Revista Estudos Avançados**, v. 33 (97), 2019.
- SOUZA, M.C.; VARGAS, A.; SAUERESSIG, G.; LUCHESE, J.; BAUER, J.M.; VIEGAS, C.V. Análise das práticas de reúso de água residual: estudo de casos em lavanderias industriais. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 20 (1), 2016, p. 497-496.
- SOUZA, F.P.; AREAS, S.M.R.; PERTEL, M. Análise de viabilidade técnica de reutilização do efluente de uma lavanderia industrial. **Perspectivas Online: Ciências Exatas e Engenharia**, v. 3 (7), 2013, p. 1-16.
- STEOVIC, S.; NERTOROVIC, Z. Impact of environment GIS modeling on sustainable water systems management. **Procedia Engineering**, v. 162, p. 293-300, 2016.
- UNESCO, UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC, AND CULTURAL ORGANIZATION - WWAP - WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME. **Wastewater the untapped resource**. The United Nations World Water Development Report, 2017. <<http://unesdoc.unesco.org/images/0024/002475/247552e.pdf>> Acesso 10/11/2020.
- WANG, Q.; WALTMAN, L. Large-scale analysis of the accuracy of the journal classification systems of Web of Science and Scopus. **Journal of Informetrics**, v. 10, 2016, p. 347-364.
- WILCOX, J.; NASIRI, F.; BELL, S.; RAHAMAN, Md. S. Urban water reuse: A triple bottom line assessment framework and review. **Sustainable Cities and Society**, v. 27, 2016, p. 448-456.
- ZHAO, L.; DAI, T.; QIAOA, Z.; SUNA, P.; HAOC, J.; YANGA, Y. Application of artificial intelligence to wastewater treatment: A bibliometric analysis and systematic review of technology, economy, management, and wastewater reuse. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 133, 2020, p. 169-182. As referências devem seguir as normas da ABNT, em fonte Calibri, tamanho 11, com alinhamento justificado e entrelinha simples.

Recebido: 20/04/2021

Aprovado: 11/03/2022

DOI: 10.3895/rts.v18n51.14106

Como citar: BILOTTA, P. et al. Reúso industrial de efluente na gestão integrada de águas urbanas. *Rev. Technol. Soc.*, Curitiba, v. 18, n. 51, p.112-133, abr./jun., 2022. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rts/article/view/14106>. Acesso em: XXX.

Correspondência:

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

