

# Seleção de sistemas de tratamento de esgotos com o emprego da análise multicritério – avaliação do emprego de diferentes estruturas de preferências

*Selection of sewage treatment systems based on Multicriteria Analysis – Evaluation of different preference structures*

José Antonio Tosta dos Reis<sup>1\*</sup> , Izadora Santana Bayer Poton<sup>1</sup> , Karinnie Nascimento Almeida<sup>1</sup> ,  
Murilo Brazzali Rodrigues<sup>1</sup> , Adriana de Oliveira Pereira dos Reis<sup>2</sup> ,  
Fernando das Graças Braga da Silva<sup>3</sup> , Antônio Sérgio Ferreira Mendonça<sup>1</sup> 

## RESUMO

O presente estudo tem como principal perspectiva o emprego da análise multicritério para a seleção de sistemas de tratamento de esgotos para a bacia hidrográfica do rio Pardo, curso d'água localizado na região sul do Estado do Espírito Santo, considerando o emprego de duas diferentes estruturas de preferências. As eficiências mínimas de remoção de demanda bioquímica de oxigênio foram utilizadas como critério de pré-seleção. A hierarquização dos sistemas de tratamento envolveu conjunto de critérios ambientais, tecnológicos, operacionais e sociais. Para a condução da análise multicritério foi empregado o método *Elimination et Choix Traduisant la Réalité* (ELECTRE II). Os resultados mostraram que a imposição de padrões para efluentes levou à seleção de variações do processo de lodos ativados, principalmente para os núcleos populacionais mais densos. A incorporação da capacidade da autodepuração dos cursos d'água reduziu o esforço de tratamento no âmbito da bacia, conduzindo, para diferentes núcleos urbanos, à seleção de variações dos sistemas de lagoas de estabilização ou de reatores *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*. As estruturas de preferência analisadas, no entanto, conduziram à seleção de diferentes sistemas de tratamento para os diferentes núcleos urbanos e condições de lançamentos, com variações mais pronunciadas para os locais com menores populações.

**Palavras chave:** bacia hidrográfica; tratamento de esgotos; análise multicritério; rio Pardo.

## ABSTRACT

The main perspective of this work is the selection of sewage treatment systems for the Pardo river hydrographic basin, a watercourse located in the southern region of the state of Espírito Santo, Brazil, by using a Multicriteria Analysis, considering two different preference structures. Minimum Biochemical Oxygen Demand removal efficiencies were used as pre-selection criteria. The treatment systems hierarchy involved a set of environmental, technological, operational and social criteria. To conduct the Multicriteria Analysis, the ELECTRE II method was used. The results indicated that the imposition of standards for effluents led to the selection of activated sludge treatment systems variations, mainly for denser population centers. The incorporation of the watercourses self-purification capacities reduced the treatment effort within the basin, leading, for different urban centers, to the selection of stabilization ponds or Upflow Anaerobic Sludge Blanket reactors treatment systems variations. The preference structures analyzed, however, led to the selection of different treatment systems for different urban centers and sewage discharge conditions, with more pronounced variations for localities presenting smaller populations.

**Keywords:** hydrographic basin; sewage treatment; multicriteria analysis; Pardo river.

<sup>1</sup>Universidade Federal do Espírito Santo – Vitória (ES), Brasil.

<sup>2</sup>Instituto Federal do Espírito Santo – Cariacica (ES), Brasil.

<sup>3</sup>Universidade Federal de Itajubá – Itajubá (MG), Brasil.

\*Autor correspondente: jatreis@gmail.com

**Conflitos de interesse:** os autores declaram não haver conflitos de interesse.

**Financiamento:** nenhum.

**Recebido:** 07/07/2021 – **Aceito:** 25/01/2022 – **Reg. ABES:** 20210185

## INTRODUÇÃO

O planejamento dos recursos hídricos usualmente envolve o gerenciamento de conflitos. Ainda que o planejamento deva proporcionar o uso múltiplo dos recursos hídricos, a disponibilidade de água, por aspectos de qualidade ou quantidade, tem crescentemente limitado diferentes usos dos corpos d'água. Dessa forma, surge a necessidade de se atender a diferentes usos em situações nas quais, muito recorrentemente, não existe disponibilidade de água compatível com as demandas.

De toda a carga orgânica diariamente produzida no Brasil (cerca de 9 mil toneladas de demanda bioquímica de oxigênio — DBO), apenas 39% são removidos por sistemas de tratamento de esgotos em operação nas sedes dos municípios brasileiros. Nesse cenário, 5,5 mil toneladas de DBO podem alcançar diariamente os corpos receptores. Com os serviços de coleta e tratamento sendo oferecidos a aproximadamente 43% da população urbana do País, 97 milhões de pessoas não são atendidas por sistemas coletivos de tratamento de esgoto (ANA, 2017).

Assumindo-se como referência a população estimada para 2035, 46 milhões de pessoas demandarão soluções conjuntas para o enfrentamento do problema de esgotamento sanitário, ou seja, irão exigir a definição do nível de tratamento dos municípios no âmbito da bacia, considerados os impactos dos lançamentos a montante sobre os municípios localizados na porção de jusante da bacia. Nesse contexto, a universalização dos serviços de esgotamento sanitário nas sedes urbanas do País demandará investimentos da ordem de R\$ 150 bilhões (ANA, 2017).

Da perspectiva de manutenção da qualidade da água dos rios brasileiros, a implantação de estações de tratamento de esgoto constitui, usualmente, a principal medida estrutural adotada. No entanto, o processo de seleção de plantas de tratamento de esgotos torna-se mais complexo quando observado do ponto de vista de uma bacia hidrográfica, com múltiplos lançamentos, de diferentes cargas, em corpos d'água com diferentes capacidades de assimilação (Sá *et al.*, 2019; Almeida *et al.*, 2021).

Nesse contexto, diversificado conjunto de modelos de qualidade de água tem sido usualmente empregado para a análise das respostas dos sistemas hídricos (Zessner *et al.*, 2017; Corrêa *et al.*, 2019; Rocha *et al.*, 2019; Fortunato *et al.*, 2020). No entanto, ainda que indispensáveis, tais modelos podem apresentar limitações de uso, função da diversidade de alternativas que demandam avaliação. Dessa forma, uma metodologia que combine modelo de qualidade de água e de técnica de otimização apresenta-se como alternativa para explorar o limite da capacidade de assimilação dos corpos d'água, o atendimento dos padrões de qualidade ambiental e a minimização dos custos totais de tratamento no âmbito de uma bacia hidrográfica. Os trabalhos de Yang *et al.* (2011), Nikoo *et al.* (2012); (2016), Valory *et al.* (2016), Santoro *et al.* (2016), Fantin *et al.* (2017), Aghasian *et al.* (2019), Sá *et al.* (2019) e Rocha *et al.* (2021) ilustram essa abordagem.

Os referidos trabalhos, no entanto, não têm como foco o emprego dos métodos de análise multicritério, limitando-se usualmente à resolução de problemas de otimização com objetivo único, sendo os demais aspectos do processo de decisão eventualmente tratados como restrições.

Segundo Tchobanoglous *et al.* (1991) e Oliveira (2004), o processo de seleção de sistemas de tratamento de esgotos envolve a avaliação de diferentes aspectos de natureza ambiental, social, econômica e técnica, reforçando a perspectiva de que a seleção de estações de tratamento de esgotos constitui problema cuja solução exige a análise de múltiplos critérios quando do processo de decisão. Diferentes trabalhos têm como foco a seleção de sistemas de tratamento de esgotos com base na análise das características das tecnologias de tratamento, constituindo a análise multicritério a ferramenta tecnológica empregada (Teclé *et al.*, 1988; Oliveira, 2004; Karimi *et al.*, 2011; Reis, 2018).

Nesse contexto, a principal finalidade deste trabalho é a seleção de sistemas de tratamento de esgotos no âmbito de uma bacia hidrográfica, com o emprego da análise multicritério, avaliando-se o efeito de diferentes estruturas de preferências sobre a seleção final dos sistemas de tratamento.

## Área de estudo

Este trabalho teve como área de estudo a bacia hidrográfica do rio Pardo (Figura 1), importante afluente da porção superior do rio Itapemirim, curso d'água de domínio do Estado do Espírito Santo. A área de drenagem da bacia do rio Pardo é de aproximadamente 611 km<sup>2</sup>, com altitude máxima de 1.580 m.

A bacia hidrográfica do rio Pardo abrange os municípios de Ibatiba e Irupi e a sede municipal de Iúna. Não possui estações de tratamento de esgoto em operação. O rio Pardo é receptor direto dos esgotos produzidos pelas sedes municipais de Ibatiba e Iúna. Os principais tributários do rio Pardo que constituem destino final de efluentes domésticos brutos urbanos são o rio Pardinho, que recebe o esgoto produzido pela sede municipal de Irupi, e o ribeirão da Perdição, que recebe o esgoto produzido nas localidades de Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças. Os valores de vazões médias de esgotos domésticos gerados pela população urbana da bacia do rio Pardo estão reunidos na Tabela 1.

## METODOLOGIA

### Pré-seleção de Sistemas de Tratamento de Esgotos

Para a pré-seleção dos sistemas de tratamento de esgoto, foram consideradas as eficiências mínimas de remoção de DBO estimadas por Bringer *et al.* (2018) para os diferentes pontos de disposição final de efluentes na bacia hidrográfica do rio Pardo (Tabela 2). As referidas eficiências foram apropriadas considerando-se três possíveis condições de tratamento, estabelecidas em conformidade com a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) n° 430/2011. São elas:

- os efluentes deveriam apresentar DBO máxima de 120 mg/L;
- os efluentes deveriam ser submetidos a tratamento com eficiência mínima de remoção de DBO de 60%; e
- seriam admitidos lançamentos de efluentes brutos, desde que fossem garantidos os padrões de qualidade ambiental associados ao curso d'água.

Reis (2018) resumizou as faixas típicas de remoção de DBO de tecnologias de tratamento de esgotos (Tabela 3). Esse conjunto de tecnologias e os valores médios das correspondentes faixas típicas de remoção de DBO foram utilizados na etapa de pré-seleção com o propósito de definir, por ponto de disposição final de efluentes, os sistemas de tratamento de esgotos a serem considerados para a etapa de hierarquização por meio da análise multicritério. Relevante observar que, para a condução da etapa de ordenação e seleção das tecnologias de tratamento, não foram considerados sistemas de tratamento de esgotos que envolvessem a disposição final dos esgotos no solo, uma vez que essas opções de tratamento são fortemente condicionadas pela litologia local, aspecto que pode apresentar importantes variações entre as diferentes porções da bacia hidrográfica e, eventualmente, em um mesmo município.

### Definição de estruturas de preferência

Para a condução da análise multicritério, foram consideradas as estruturas de preferências (conjuntos de critérios e de pesos relativos) propostas por Bringer *et al.* (2018) e Reis (2018).

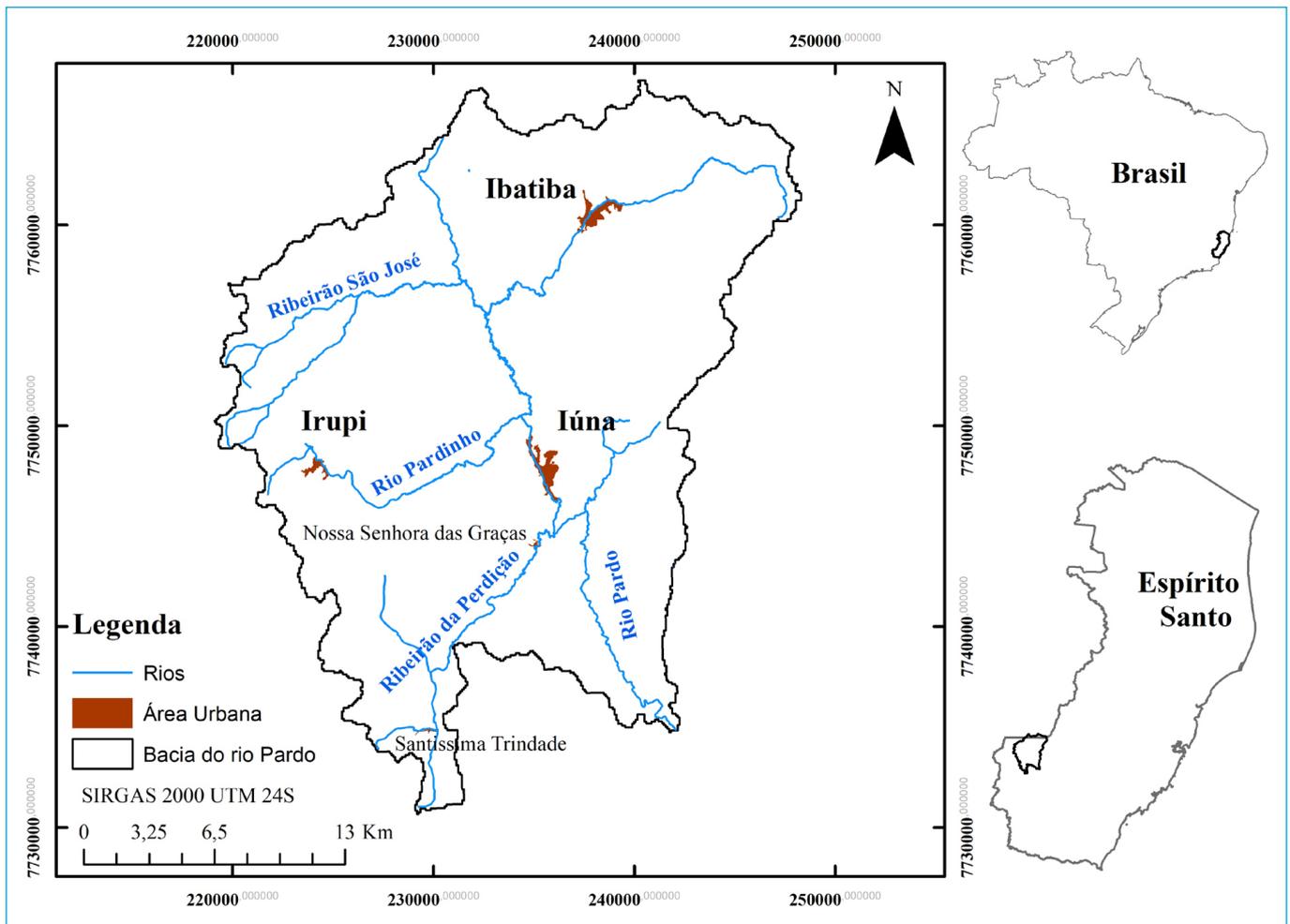


Figura 1 - Sistema hídrico da bacia hidrográfica do rio Pardo.

Tabela 1 - Valores de vazão média de esgotos domésticos da população urbana da bacia do rio Pardo.

Núcleos urbanos	Vazão média de esgoto doméstico (L/s)	População urbana (habitantes)
Ibatiba	24,3	18.125
Irupi	5,2	4.918
Iúna	19,9	14.821
Santíssima Trindade	0,3	301
Nossa Senhora das Graças	0,6	600

Fonte: Calmon (2015).

Bringer *et al.* (2018) definiram estrutura de preferências com base no trabalho de Cordeiro Netto *et al.* (2001), no qual participantes do Programa de Pesquisas em Saneamento Básico (PROSAB), Rede 2, responderam a um questionário em que atribuíam pesos para 18 critérios, levando em consideração diferentes contextos tecnológicos (sistema de pequeno porte em local de alto risco ambiental-epidemiológico; sistema de pequeno porte em local de baixo risco ambiental-epidemiológico; sistema de médio porte em local de alto risco ambiental-epidemiológico).

e; sistema de médio porte em local de baixo risco ambiental-epidemiológico). A referida diferenciação de contexto permitiu que, quando do emprego da análise multicritério, diferentes combinações de pesos fossem adotadas para os diferentes núcleos urbanos da bacia hidrográfica do rio Pardo.

Na estrutura de preferências proposta por Reis (2018), os pesos para os critérios foram definidos após a condução de três grupos focados (Academia, Tratamento e Regulação), assim conformados:

- Academia — grupo formado por acadêmicos e pós-graduandos, com experiência na área de recursos hídricos e saneamento ambiental (universidades e institutos federais);
- Tratamento — grupo formado por profissionais da área de saneamento, com experiência na área de tratamento de esgotos e recursos hídricos (concessionária responsável pela operação de sistemas de tratamento de esgotos no Estado do Espírito Santo) e;
- Regulação — grupo formado por profissionais vinculados ao órgão regulador de recursos hídricos (agência reguladora dos recursos hídricos).

As Tabelas 4 e 5 apresentam as estruturas de preferências estabelecidas por Bringer *et al.* (2018) e Reis (2018), respectivamente.

**Tabela 2 - Eficiências mínimas de tratamento de esgotos estimadas para os núcleos urbanos da bacia hidrográfica do rio Pardo.**

Condição de Lançamento	Ibatiba (ETE 01) (%)	Irupi (ETE 02) (%)	Iúna (ETE 03) (%)	Santíssima Trindade (ETE 04) (%)	Nossa Senhora das Graças (ETE 05) (%)
DBO máxima de 120 mg/L	90	90	90	70	70
Eficiência mínima de 60%	90	90	90	60	60
Incorporação da autodepuração	90	81,1	<30 (27,9)	<30 (3,9)	<30 (2,3)

DBO: demanda bioquímica de oxigênio.

Fonte: Bringer et al. (2018).

**Tabela 3 - Tecnologias de tratamento de esgotos, com faixa típica de eficiência de remoção da fração carbonácea da matéria orgânica**

Tecnologias	Faixa típica de eficiência de remoção de DBO (%)
Tratamento primário convencional	30-35
Tratamento primário avançado	45-80
Lagoa facultativa	75-85
Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa	75-85
Lagoa aerada facultativa	75-85
Lagoa aerada de mistura completa + lagoa de sedimentação	75-85
Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa de maturação	80-85
Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa alta taxa	80-85
Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + remoção de algas	85-90
Tanque séptico + filtro anaeróbio	80-85
Reator UASB	60-75
UASB + lodos ativados	83-93
UASB + biofiltro aerado submerso	83-93
UASB + filtro anaeróbio	75-87
UASB + filtro biológico de alta carga	80-93
UASB + lagoas de polimento	77-87
UASB + lagoa aerada facultativa	75-85
UASB + lagoa aerada de mistura completa + lagoa decantação	75-85
Lodos ativados convencional	85-93
Lodos ativados de aeração prolongada	90-97
Lodos ativados batelada	90-97
Lodos ativados convencional com remoção biológica de N	85-93
Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P	85-93
Lodos ativados convencional + filtração terciária	93-98
Filtro biológico percolador de baixa carga	85-93
Filtro biológico percolador de alta carga	80-90
Biofiltro aerado submerso com nitrificação	88-95
Tanque séptico + biodisco	88-95

DBO: demanda bioquímica de oxigênio; UASB: *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*;

N/P: relação nitrogênio/fósforo.

Fonte: adaptado de Reis (2018).

**Tabela 4 - Estrutura de preferência adotada por Bringer et al. (2018).**

Critérios	Pesos	
	Ibatiba, Irupi e Iúna	Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças
Eficiência de remoção de nitrogênio	4,23	2,31
Eficiência de remoção de fósforo	4,42	1,73
Eficiência de remoção de coliformes	8,27	5,19
Demanda por área de implantação	4,42	5,38
Requisitos de energia	2,50	1,92
Custos de implantação	4,62	6,92
Custos de operação	5,19	7,50
Quantidade de lodo a ser tratado	3,27	3,27
Quantidade de lodo a ser disposto	4,04	3,27
Capacidade de resistência a variações de vazão	4,04	2,69
Capacidade de resistência a variações do afluente	4,04	2,69
Capacidade de resistência a constituintes tóxicos	4,04	2,69
Simplicidade operacional	4,23	6,73
Geração de odor	5,00	3,65
Geração de ruído	5,00	3,65
Geração de aerossóis	5,00	3,65
Atração de insetos	5,00	3,65

Fonte: Bringer et al. (2018).

A Tabela 6 exhibe, para as diferentes opções de tratamento de esgotos consideradas nesta pesquisa, critérios técnicos e econômicos aplicáveis ao processo de seleção de sistemas de tratamento de esgotos. A referida tabela, além de sumarizar os critérios empregados no processo de seleção, apresenta os valores médios das faixas de aplicação de cada critério para os diferentes sistemas de tratamento de esgotos.

Relevante observar que as informações reunidas na Tabela 6 permitiram a normalização dos valores associados aos diferentes critérios de seleção empregados por Bringer et al. (2018) e Reis (2018), atividade que antecedeu a aplicação do método de análise multicritério para a ordenação e seleção final dos

**Tabela 5 - Estrutura de preferência estabelecida por Reis (2018).**

Critérios de Seleção	Pesos
Eficiência de remoção de matéria orgânica	10,0
Eficiência de remoção de nitrogênio	7,0
Eficiência de remoção de fósforo	7,3
Eficiência de remoção de coliformes	8,7
Requisitos de energia	8,0
Demanda por área de implantação	6,3
Custos de implantação	7,0
Custos de operação	7,7
Quantidade de lodo a ser tratado	5,7
Quantidade de lodo a ser disposto	6,7
Confiabilidade do sistema	6,0
Simplicidade operacional	6,0
Capacidade de resistência a variações de vazão	6,0
Capacidade de resistência a variações do afluente	6,0
Capacidade de resistência a constituintes tóxicos	3,3
Interferência decorrente da geração de odor	6,7
Interferência decorrente da geração de ruído	4,7
Interferência decorrente da geração de aerossóis	2,7
Possibilidade de atração de insetos	2,3

Fonte: Reis (2018).

sistemas de tratamento para os diferentes pontos de disposição de efluentes da bacia hidrográfica do rio Pardo.

### Análise Multicritério

Para a condução da análise multicritério, foi empregado método da família *Elimination et Choix Traduisant la Réalité* (ELECTRE). Segundo Henriques *et al.* (2019), os métodos da família ELECTRE definem uma série de processos sobre as alternativas consideradas, as quais pertencem ao conjunto de possíveis soluções do problema de decisão analisado.

No presente trabalho, o método da família ELECTRE usado foi o ELECTRE II, desenvolvido para solucionar problemas de ordenação, que busca hierarquizar um conjunto de alternativas da melhor para a pior utilizando conceitos de concordância e discordância, conforme procedimento detalhadamente apresentado por Braga Júnior *et al.* (2002).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os sistemas pré-selecionados para a sede do município de Iúna, por condição de lançamento, estão reunidos na Tabela 7. Conjuntos similares de sistemas de tratamento de esgotos, decorrentes do processo de pré-seleção, foram produzidos para os demais núcleos urbanos da bacia hidrográfica do rio Pardo.

Com base no conjunto de tecnologias pré-selecionadas, a etapa subsequente envolveu a hierarquização das tecnologias de tratamento, considerando um conjunto de critérios tidos como relevantes para o processo de seleção. É relevante observar que um conjunto de critérios usualmente é indicado por diferentes autores para a condução do processo de seleção de sistemas de tratamento de esgotos. Custos de implantação (incluindo-se particularmente a demanda de

área para a implantação dos sistemas), restrições ambientais, demanda por energia e demais custos para a operação dos sistemas são aspectos que devem ser considerados durante o processo de seleção, conforme sugerem Campos (1994), Oron (1996), Cordeiro Netto *et al.* (2001), Garrido-Baserba *et al.* (2016), Castillo *et al.* (2016) e Reis (2018). No entanto, existe pronunciada divergência quanto à eventual inclusão de critérios de seleção que abarquem aspectos sociais, a diversidade de restrições ambientais, a perspectiva de gerenciamento do lodo ou a resiliência dos sistemas de tratamento diante das variações de vazão e qualidade dos efluentes. Ainda que diferentes trabalhos sugiram critérios de seleção similares, recorrentemente se limitam apenas à discussão qualitativa da relevância de cada aspecto associado ao processo de decisão.

Nesse contexto, os trabalhos propostos por Bringer *et al.* (2018) e Reis (2018), além de trabalharem com relevante conjunto de critérios ambientais, técnicos, econômicos e sociais, permitem avaliar a influência da adoção de diferentes estruturas de preferências sobre a condução da hierarquização das opções de tratamento, em função da definição diferentes pesos para um mesmo critério de seleção.

A Figura 2 apresenta as hierarquizações (Kernel) dos sistemas de tratamento de esgotos para a sede do município de Iúna, estabelecidas com base nas estruturas de preferências empregadas por Bringer *et al.* (2018) e Reis (2018). Na referida figura, as hierarquizações foram definidas admitindo-se a condição de lançamento em que a capacidade de autodepuração poderia ser responsável pela assimilação dos efluentes, respeitados os padrões de qualidade estabelecidos para os cursos d'água. Figuras similares foram estabelecidas para os demais núcleos urbanos e condições de disposição final de efluentes.

As Tabelas de 8 a 12 sumarizam, por local e estrutura de preferências utilizada, os sistemas de tratamento de esgotos que foram priorizados por meio da análise multicritério conduzida com o auxílio do método ELECTRE II.

Conforme a análise da Figura 2 e das figuras similares produzidas para os demais núcleos urbanos e condições de disposição final de efluentes e das tabelas de 8 a 12, são relevantes as seguintes considerações:

- Naquelas condições de lançamento em que foram impostos padrões de qualidade para os efluentes (DBO máxima de 120 mg/L ou eficiência mínima de remoção de DBO de 60%), a estrutura de preferência proposta por Bringer *et al.* (2018) conduziu à seleção de sistemas de tratamento de esgotos mecanizados para os núcleos urbanos mais populosos (sistemas de lodos ativados e suas variações) e sistemas não mecanizados para os distritos de Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças. A estrutura de preferência proposta por Reis (2018), por sua vez, conduziu invariavelmente à seleção de sistemas de tratamento mecanizados, condição particularmente rigorosa para os distritos de Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças em função das pequenas densidades populacionais que apresentam.
- Para as sedes municipais dos municípios de Ibatiba, Iúna e Irupi, conservada a mesma estrutura de preferência, foram selecionados os mesmos sistemas de tratamento quando impostos padrões de qualidade para os efluentes. Nesse contexto, a imposição de DBO máxima de 120 mg/L ou a definição de eficiência mínima de remoção de DBO de 60% conduziram, invariavelmente, aos mesmos sistemas de tratamento de esgotos.
- Ao se considerar a incorporação da capacidade de autodepuração dos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Pardo, as eficiências de tratamento demandadas para a remoção de DBO foram reduzidas para os diferentes núcleos urbanos, à exceção da sede do município de Ibatiba. Como consequência,

**Tabela 6 – Critérios técnicos e custos de implantação, operação e manutenção de sistemas de tratamento de esgotos.**

Alternativas	Eficiência Média de Remoção				Demanda de área (m <sup>2</sup> /hab)	Potência para aeração (kWh/hab.ano)	Volume de Lodo	
	DBO (%)	N (%)	P (%)	Coliformes (unid. log)			Lodo líquido a ser tratado (L/hab.ano)	Lodo desidratado a ser disposto (L/hab.ano)
Tratamento primário convencional	32,5	30	35	1	0,03	0	115	6
Tratamento primário avançado	62,5	30	90	1	0,05	0	150	275
Lagoa facultativa	80	60	35	1,5	3	0	130	6,5
Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa	80	60	35	1,5	2,25	0	115	6,5
Lagoa aerada facultativa	80	30	35	1,5	0,38	14,5	160	15
Lagoa aerada mistura completa + lagoa de sedimentação	80	30	35	1,5	0,3	19	160	15
Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa de maturação	82,5	65	50	4	4	0	285	8
Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa alta taxa	82,5	90	60	3,5	2,75	1	160	11
Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + remoção de algas	87,5	60	35	3,5	2,45	0	160	11
Tanque séptico + filtro anaeróbio	82,5	60	35	1,5	0,28	0	230	16
Reator UASB	67,5	60	35	1	0,07	0	80	8
UASB + lodos ativados	88	60	35	1,5	0,14	17	185	22,5
UASB + biofiltro aerado submerso	88	60	35	1,5	0,1	17	185	22,5
UASB + filtro anaeróbio	81	60	35	1,5	0,1	0	180	11,5
UASB + filtro biológico de alta carga	86,5	60	35	1,5	0,15	0	200	15
UASB + lagoas de polimento	82	65	50	4	2	0	315	10,5
UASB + lagoa aerada facultativa	80	30	35	1,5	0,23	3,5	200	15
UASB + lagoa aerada mist. completa + lagoa decantação	80	30	35	1,5	0,2	6	200	15
Lodos ativados convencional	89	60	35	1,5	0,19	22	270	30
Lodo ativado aeração prolongada	93,5	60	35	1,5	0,19	27,5	235	30
Lodos ativados batelada	93,5	60	35	1,5	0,19	27,5	235	30
Filtro biológico percolador de baixa carga	89	60	35	1,5	0,23	0	225	25
Filtro biológico percolador de alta carga	85	60	35	1,5	0,19	0	225	25
Biofiltro aerado submerso com nitrificação	91,5	60	35	1,5	0,13	22	185	27,5
Tanque séptico + biodisco	91,5	60	35	1,5	0,15	0	275	25

DBO: demanda bioquímica de oxigênio; UASB: *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*.

**Tabela 6 – Critérios técnicos e custos de implantação, operação e manutenção de sistemas de tratamento de esgotos (continuação).**

Alternativas	Capacidade de resistência a variações do efluente e cargas de choque			Confiabilidade	Simplicidade Operação e Manutenção	Menor possibilidade de problemas ambientais			
	Vazão	Qualidade	Tóxicos			Maus Odores	Ruídos	Aerossóis	Insetos e Vermes
Tratamento primário convencional	4	5	4	4	3	2	4	5	3
Tratamento primário avançado	4	5	4	4	3	3	4	5	3
Lagoa facultativa	4	4	3	4	5	3	5	5	2
Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa	4	4	3	4	5	1	5	5	2
Lagoa aerada facultativa	4	4	3	4	4	4	1	1	3
Lagoa aerada mistura completa + lagoa de sedimentação	3	4	3	3	3	3	1	1	2
Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa de maturação	4	4	3	4	5	3	5	5	2
Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa alta taxa	4	4	3	4	3	3	2	2	2
Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + remoção de algas	4	4	3	4	3	3	5	5	2
Tanque séptico + filtro anaeróbio	3	3	2	3	4	2	4	5	4
Reator UASB	2	2	2	3	4	2	4	5	4
UASB + lodos ativados	2	2	2	4	1	2	1	3	4
UASB + biofiltro aerado submerso	2	2	2	4	2	2	2	5	4
UASB + filtro anaeróbio	2	2	2	3	4	2	4	5	4
UASB + filtro biológico de alta carga	2	2	2	4	3	2	4	4	3
UASB + lagoas de polimento	2	2	2	4	5	2	5	5	2
UASB + lagoa aerada facultativa	2	2	2	4	4	2	1	1	3
UASB + lagoa aerada mist. completa + lagoa decantação	2	2	2	3	3	2	1	1	2
Lodos ativados convencional	3	3	2	4	1	4	1	3	4
Lodo ativado aeração prolongada	4	4	3	4	2	5	1	3	4
Lodos ativados batelada	4	4	3	4	3	3	1	3	4
Filtro biológico percolador de baixa carga	3	2	2	4	3	4	4	4	2
Filtro biológico percolador de alta carga	4	3	3	4	3	4	4	4	3
Biofiltro aerado submerso com nitrificação	3	3	2	4	2	5	2	5	4
Tanque séptico + biodisco	3	3	2	3	3	4	4	5	3

UASB: *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*.

Fonte: Adaptado de von Sperling (2005) e Jordão *et al.* (2017).

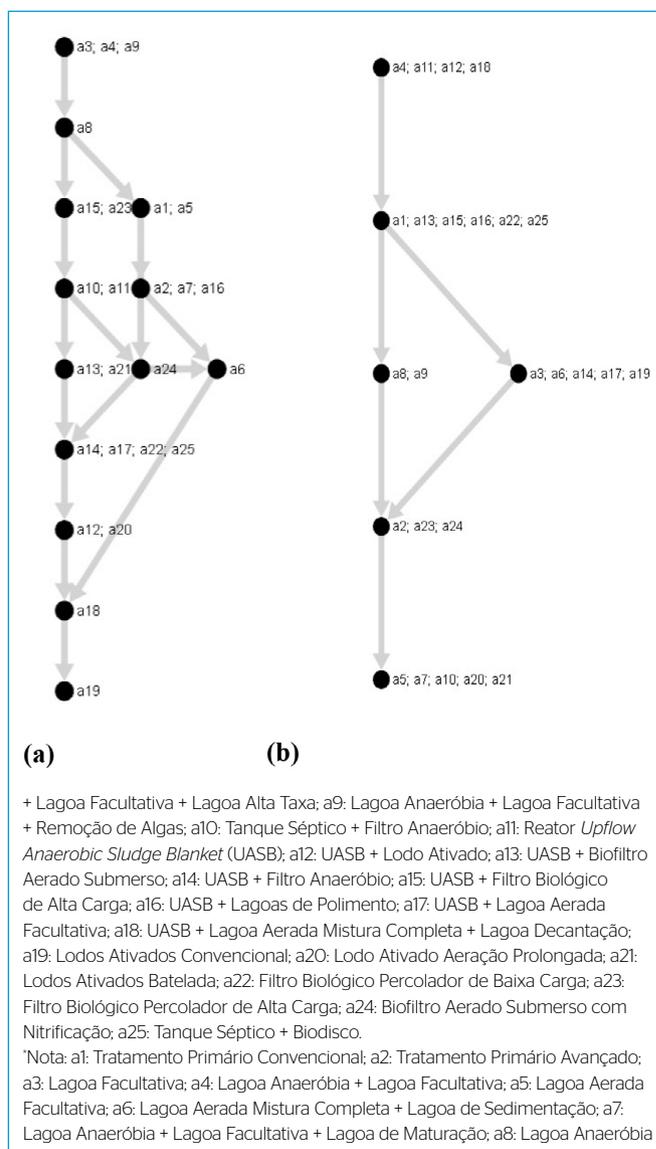
**Tabela 7 - Sistemas de tratamento de esgotos pré-selecionados para a sede municipal de Iúna.**

Local	Condição de lançamento	Sistemas de tratamento pré-selecionados
Iúna	DBO máxima de 120 mg/L	Lodos Ativados Convencional Lodo Ativado Aeração Prolongada Lodos Ativado Batelada Filtro Biológico Percolador de Baixa Carga Biofiltro Aerado Submerso com Nitrificação Tanque Séptico + Biodisco
	Eficiência mínima de 60%	Lodos Ativados Convencional Lodo Ativado Aeração Prolongada Lodos Ativado Batelada Filtro Biológico Percolador de Baixa Carga Biofiltro Aerado Submerso com Nitrificação Tanque Séptico + Biodisco
	Incorporação da autodepuração	Tratamento Primário Convencional Tratamento Primário Avançado Lagoa Facultativa Lagoa Anaeróbia + Lagoa Facultativa Lagoa Aerada Facultativa Lagoa Aerada Mistura Completa + Lagoa de Sedimentação Lagoa Anaeróbia + Lagoa Facultativa + Lagoa de Maturação Lagoa Anaeróbia + Lagoa Facultativa + Lagoa Alta Taxa Lagoa Anaeróbia + Lagoa Facultativa + Remoção de Algas Tanque Séptico + Filtro Anaeróbio Reator UASB UASB + Lodo Ativado UASB + Biofiltro Aerado Submerso UASB + Filtro Anaeróbio UASB + Filtro Biológico de Alta Carga UASB + Lagoas de Polimento UASB + Lagoa Aerada Facultativa UASB + Lagoa Aerada Mistura Completa + Lagoa Decantação Lodos Ativados Convencional Lodo Ativado Aeração Prolongada Lodos Ativado Batelada Filtro Biológico Percolador de Baixa Carga Filtro Biológico Percolador de Alta Carga Biofiltro Aerado Submerso com Nitrificação Tanque Séptico + Biodisco

DBO: demanda bioquímica de oxigênio; UASB: *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*.

o conjunto de sistemas de tratamento de esgotos pré-selecionados para as sedes municipais de Iúna e Irupi e dos distritos de Nossa Senhora das Graças e Santíssima Trindade foi mais amplo, abrangendo diferentes tecnologias (de variações de sistemas de lagoas de estabilização até sistemas com elevados níveis de mecanização).

- Com a incorporação da capacidade de autodepuração dos cursos d'água, a seleção dos sistemas de tratamento com base na estrutura de preferência proposta por Bringer et al. (2018) conduziu à seleção de sistema mecanizado apenas para a sede do município de Ibatiba (núcleo urbano mais populoso da bacia), indicando a adoção de variações do sistema de lagoas de estabilização ou reatores *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB) para os demais núcleos urbanos da área de estudo. Já a estrutura de preferências estabelecida por Reis (2018), ainda que tenha produzido seleção final



**Figura 2 - Hierarquização dos sistemas de tratamento para a sede do município de Iúna, considerada a disposição final de efluentes brutos e as estruturas de preferências estabelecidas por (a) Bringer et al. (2018) e (b) Reis (2018).**

**Tabela 8 - Sistemas de tratamento de esgotos selecionados para Ibatiba.**

Condição de lançamento	Estrutura de preferências	
	Bringer et al. (2018)	Reis (2018)
Eficiência mínima de 60%	Lodos Ativado em Batelada	Lodos Ativados Convencional
DBO máxima de 120 mg/L	Lodos Ativado em Batelada	Lodos Ativados Convencional
Incorporação da autodepuração	Lodos Ativado em Batelada	Lodos Ativados Convencional

DBO: demanda bioquímica de oxigênio.

similar, sugeriu a possibilidade da adoção de sistemas que envolvam a adoção de sistemas de lagoas de estabilização, reatores UASB e processos de lodos ativados para as sedes municipais de Irupi e Iúna e para os distritos de Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças.

**Tabela 9 – Sistemas de tratamento de esgotos selecionados para Irupi.**

Condição de lançamento	Estrutura de preferências	
	Bringer <i>et al.</i> (2018)	Reis (2018)
Eficiência mínima de 60%	Lodos Ativados em Batelada	Lodos Ativados Convencional
DBO máxima de 120 mg/L	Lodos Ativados em Batelada	Lodos Ativados Convencional
Incorporação da autodepuração	Lagoa Facultativa Lagoa Anaeróbia + Lagoa Facultativa Lagoa Anaeróbia + Lagoa Facultativa + Remoção de Algas	Lagoa Anaeróbia + Lagoa Facultativa UASB + Lodos Ativados UASB + Lagoa Aerada Mistura Completa + Lagoa Decantação

DBO: demanda bioquímica de oxigênio; UASB: *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*.

**Tabela 10 – Sistemas de tratamento de esgotos selecionados para Iúna.**

Condição de lançamento	Estrutura de preferências	
	Bringer <i>et al.</i> (2018)	Reis (2018)
Eficiência mínima de 60%	Lodos Ativados em Batelada	Lodos Ativados Convencional
DBO máxima de 120 mg/L	Lodos Ativados em Batelada	Lodos Ativados Convencional
Incorporação da autodepuração	Lagoa Facultativa Lagoa Anaeróbia + Lagoa Facultativa Lagoa Anaeróbia + Lagoa Facultativa + Remoção de Algas	Lagoa Anaeróbia + Lagoa Facultativa Reator UASB UASB + Lodos Ativados UASB + Lagoa Aerada Mistura Completa + Lagoa Decantação

DBO: demanda bioquímica de oxigênio; UASB: *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*.

**Tabela 11 – Sistemas de tratamento de esgotos selecionados para Santíssima Trindade.**

Condição de lançamento	Estrutura de preferências	
	Bringer <i>et al.</i> (2018)	Reis (2018)
Eficiência mínima de 60%	Lagoa Facultativa Lagoa Anaeróbia + Lagoa Facultativa Lagoa Anaeróbia + Lagoa Facultativa + Remoção de Algas	Lodos Ativados Convencional
DBO máxima de 120 mg/L	Lagoa Facultativa Lagoa Anaeróbia + Lagoa Facultativa Lagoa Anaeróbia + Lagoa Facultativa + Remoção de Algas Reator UASB	Lodos Ativados Convencional
Incorporação da autodepuração	Lagoa Facultativa Lagoa Anaeróbia + Lagoa Facultativa Lagoa Anaeróbia + Lagoa Facultativa + Lagoa de Maturação	Lagoa Anaeróbia + Lagoa Facultativa Reator UASB UASB + Lodos Ativados UASB + Lagoa Aerada Mistura Completa + Lagoa Decantação

DBO: demanda bioquímica de oxigênio; UASB: *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*.

**Tabela 12 – Sistemas de tratamento de esgotos selecionados para Nossa Senhora das Graças.**

Condição de lançamento	Estrutura de preferências	
	Bringer <i>et al.</i> (2018)	Reis (2018)
Eficiência mínima de 60%	Lagoa Facultativa Lagoa Anaeróbia + Lagoa Facultativa Lagoa Anaeróbia + Lagoa Facultativa + Remoção de Algas	Lodos Ativados Convencional
DBO máxima de 120 mg/L	Lagoa Facultativa Lagoa Anaeróbia + Lagoa Facultativa Lagoa Anaeróbia + Lagoa Facultativa + Remoção de Algas Reator UASB	Lodos Ativados Convencional
Incorporação da autodepuração	Lagoa Facultativa Lagoa Anaeróbia + Lagoa Facultativa Lagoa Anaeróbia + Lagoa Facultativa + Lagoa de Maturação	Lagoa Anaeróbia + Lagoa Facultativa Reator UASB UASB + Lodos Ativados UASB + Lagoa Aerada Mistura Completa + Lagoa Decantação

DBO: demanda bioquímica de oxigênio; UASB: *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*.

## CONCLUSÕES

O emprego da análise multicritério, conduzida com o auxílio do método ELECTRE II, permitiu a incorporação de critérios sociais, ambientais, tecnológicos e de operação ao processo de seleção de sistemas de tratamento de esgotos para os núcleos urbanos da bacia hidrográfica do rio Pardo.

A estrutura de preferência proposta por Reis (2018) apresentou-se mais rigorosa, indicando a adoção de sistemas mecanizados de tratamento de esgoto para as sedes dos municípios de Iúna, Ibatiba e Irupi e para os distritos de Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças, mesmo quando considerada a capacidade de autodepuração dos cursos d'água da área de estudo. Já a estrutura de preferência proposta por Bringer *et al.* (2018) conduziu a sistemas com menores complexidades operacionais e sistemas não mecanizados, especialmente variações dos sistemas com lagoas de estabilização e reatores UASB, para as sedes dos municípios de Iúna e Irupi e para os distritos de Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças, indicando a adoção de sistema de lodos ativados apenas para a sede municipal de Ibatiba.

## CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Reis, J.A.T.: Conceituação, Análise Formal, Investigação, Metodologia, Software, Escrita – Primeira Redação, Escrita – Revisão e Edição. Poton, I.S.B.: Curadoria dos Dados, Investigação, Metodologia, Software, Escrita – Primeira Redação. Almeida, K.N.: Análise Formal, Investigação, Metodologia, Escrita – Revisão e Edição. Rodrigues, M.B.: Análise Formal, Investigação, Metodologia, Escrita – Revisão e Edição. Reis, A.O.P.: Análise Formal, Investigação, Metodologia, Escrita – Revisão e Edição. Silva, F.G.B.: Análise Formal, Investigação, Metodologia, Escrita – Revisão e Edição. Mendonça, A.S.F.: Análise Formal, Investigação, Metodologia, Escrita – Revisão e Edição.

## REFERÊNCIAS

- AGHASIAN, K.; MORIDI, A.; MIRBAGHERI, A.; ABBASPOUR, M.A. Conflict resolution method for waste load reallocation in river systems. *International Journal of Environmental Science and Technology*, v. 16, n. 1, p. 79-88, 2019. <https://doi.org/10.1007/s13762-018-1993-3>
- ALMEIDA, K.N.; REIS, J.A.T.; MENDONÇA, A.S.F.; SILVA, F.G.B. Methodology to support the planning of sewage treatment systems within river basins. *International Journal of Environmental Science and Technology*, v. 19, p. 3741-3756, 2021. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03387-y>
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). *Atlas esgotos: despolição de bacias hidrográficas*. Brasília: ANA, 2017.
- BRAGA JÚNIOR, B.P.F.; GOBETTI, L.C. Análise multiobjetivo. In: PORTO, R.L.L. (Org.). *Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos*. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, p 361-420, 2002.
- BRINGER, L.M.; REIS, J.A.T.; MENDONÇA, A.S.F. Wastewater treatment systems selection inside watersheds by using multiobjective analysis. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 23, p. e22, 2018. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.231820170140>
- CALMON, A.P.S. *Metodologia para suporte ao processo de enquadramento dos cursos d'água superficiais considerando curvas de permanência de qualidade e processo de autodepuração*. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Universidade de Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015.
- CALMON, A.P.S.; SOUZA, J.C.S.; REIS, J.A.T.; MENDONÇA, A.S.F. Uso combinado de curvas de permanência de qualidade e modelagem da autodepuração como ferramenta para suporte ao processo de enquadramento de cursos d'água superficiais. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 21, n. 1, p. 118-133, 2016. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p118-133>
- CAMPOS, J. R. *Alternativas para tratamento de esgotos - Pré-tratamento de águas para abastecimento*. Americana: Consórcio Intermunicipal das Bacias dos Rios Piracicaba e Capivari, 1994.
- CASTILLO, A.; PORRO, J.; GARRIDO-BASERBA, M.; ROSSO, D.; RENZI, D.; FATONE, F.; GÓMES, V.; COMAS, J.; POCH, M. Validation of a decision support tool for wastewater treatment selection. *Journal of Environmental Management*, v. 184, p. 409-418, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.087>
- CORDEIRO NETTO, O.M.; SOUZA, M.A.A.; LOPES JÚNIOR, R.P. Retrospectiva e prospectiva da análise tecnológica das alternativas para pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios. In: CHERNICHARO, C.A.L. (Org.). *Pós-tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios - Coletânea de Trabalhos Técnicos - Volume 2*. Belo Horizonte: Programa de Pesquisa em Saneamento Básico (PROSAB); Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), 2001. p. 253-272.
- CORRÊA, H.; RIEGEL, R.; ALVES, D.; OSÓRIO, D.; COSTA, G.; HUSSAIN, C.; QUEVEDO, D. Multivariate statistical analysis and use of geographic information systems in raw water quality assessment. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais (Online)*, n. 52, p. 1-15, 2019. <https://doi.org/10.5327/Z2176-947820190431>
- FANTIN, L.L.D.; REIS, J.A.T.; MENDONÇA, A.S.F. Proposal of a methodology for pre-selection of sewage treatment systems within watersheds. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 22, p. e12, 2017. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.011716079>
- FORTUNATO, T.C.S.; REIS, J.A.T.; MENDONÇA, A.S.F.; SILVA, F.G.B. Behavior simulation of nitrogen compounds in rivers with uncertainty analysis. *Ambiente e Água*, v. 15, n. 3, p. e2449, 2020. <https://doi.org/10.4136/ambiente.2449>
- GARRIDO-BASERBA, M.; REIF, R.; MOLINOS-SENANTE, M.; LARREA, L.; CASTILLO, A.; VERDAGUER, M.; POCH, M. Application of a multi-criteria decision model to select of design choices for WWTPs. *Clean Technologies and Environmental Policy*, v. 18, p. 1097-1109, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10098-016-1099-x>
- HENRIQUES, R.S.; COELHO, L.M.G. A multi-objective optimization model to support the municipal solid waste management. *Environmental Engineering & Management Journal*, v. 18, n. 5, p. 1077-1088, 2019.
- JORDÃO, E.P.; PESSOA, C.A. *Tratamento de Esgotos Domésticos*. 8. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2017.
- KARIMI, A.R.; MEHRDADI, N.; HASHEMIAN, S.J.; NABI, B.G.R.; TAVAKKOLI, M.R. Selection of wastewater treatment process based on the analytical hierarchy process and fuzzy analytical hierarchy process methods. *International Journal of Environmental Science & Technology*, v. 8, n. 2, p. 267-280, 2011. <https://doi.org/10.1007/BF03326215>
- NIKOO, M.R.; BEIGLOU, P.H.B.; MAHJOURI, N. Optimizing Multiple-Pollutant waste load allocation in rivers: an interval parameter Game Theoretic Model. *Water Resources Management*, v. 30, n. 12, p. 4201-4221, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1415-6>
- NIKOO, M.R.; KERACHIAN, R.; NIKSOKHAN, M.H. Equitable waste load allocation in rivers Using Fuzzy Bi-matrix Games. *Water Resources Management*, v. 26, n. 15, p. 4539-4552, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0165-3>
- OLIVEIRA, S.V.W.B. *Modelo para tomada de decisão na escolha de sistema de tratamento de esgoto sanitário*. 197f. Tese (Doutorado em Administração), Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- ORON, G. Management modeling of integrative wastewater treatment and reuse systems. *Water Science and Technology*, v. 33, n. 11-12, p. 95-105, 1996. [https://doi.org/10.1016/0273-1223\(96\)00411-8](https://doi.org/10.1016/0273-1223(96)00411-8)
- PEREIRA, V.; COSTA, H.G.; NEPOMUCENO, L.D.O. J-ELECTRE-v2.0. (Computer Software). 2019. Disponível em <<https://sourceforge.net/projects/j-ELECTRE/files/>>. Acesso em: 09 jul., 2019
- REIS, A.O.P. Sistemática para seleção de tecnologias de tratamento de efluentes: uma análise multicriterial aplicada à bacia hidrográfica. 133f. Tese (Doutorado em Engenharia na área de concentração de Sistemas de Produção), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.
- ROCHA, S.; MESQUITA, J.; LIMA NETO, I. Análise e modelagem das relações entre nutrientes e fitoplâncton em reservatórios do Ceará. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais (Online)*, n. 54, p. 134-147, 2019. <https://doi.org/10.5327/Z2176-947820190536>

- ROCHA, L.G.; ALMEIDA, K.N.; REIS, J.A.T.; MENDONÇA, A.S.F.; SILVA, F.G.B. Sewage treatment efficiencies estimation for urban areas located in the River Pardo's watershed by associating nonlinear programming and water quality modeling. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais (Online)*, v. 56, n. 1, p. 65-67, 2021. <https://doi.org/10.5327/Z2176-947820200731>.
- SÁ, G.L.N.; REIS, J.A.T.; MENDONÇA, A.S.F.; SILVA, F.G.B. Methodology for minimum nitrogen compounds removal efficiencies estimation and wastewater treatment systems pre-selection: a watershed approach. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 24, p. e41, 2019. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.241920180173>
- SANTORO, M.C.; REIS, J.A.T.; MENDONÇA, A.S.F. Performance evaluation of optimization models in the determination of wastewater treatment efficiencies inside watersheds. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 21, n. 4, p. 694-706, 2016. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.011616031>
- TCHOBANOGLIOUS, G.; BURTON, F.L. *Wastewater engineering: treatment, disposal, and reuse*. New York: McGraw-Hill, 1991.
- TECLE, A.; FOGEL, M.; DUCKSTEIN, L. Multicriterion selection of wastewater management alternatives. *Journal of Water Resources Planning and Management Division*, v. 114, n. 4, p. 383-398, 1988. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1988.tb03035.x>
- VALORY, J.L.; REIS, J.A.T.; MENDONÇA, A. S.F. Combining genetic algorithms with a water quality model to determine efficiencies of sewage treatment systems in watersheds. *Journal of Environmental Engineering*, v. 142, n. 3, p. 1-9, 2016. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001048](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001048)
- VON SPERLING, M. *Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias - Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005.
- YANG, C.C.; CHEN, C.S.; LEE, C.S. Comprehensive River water quality management by simulation and optimization models. *Environmental Modeling and Assessment*, v. 16, p. 283-294, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10666-010-9247-x>
- ZESSNER, M.; SCHÖNHART, M.; PARAJKA, J.; TRAUTVETTER, H.; MITTER, H.; KIRCHNER, M.; HEPP, G.; BLASCHKE, A.F.; STRENN, B.; SCHMID, E. A novel integrated modelling framework to assess the impacts of climate and socio-economic drivers on land use and water quality. *Science of The Total Environment*, v. 579, p. 1137-1151, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.092>