

Reúso não potável de água: Aspectos legais, aproveitamento urbano e agrícola, e tecnologias emergentes para produção de água para reúso

Nota Técnica 1 - Tópicos de interesse

Non-potable water reuse: legal aspects, urban and agricultural use, and emerging technologies for the production of water for reuse
Technical Note 1 - Interest topics

André Bezerra dos Santos^{1*}, Cesar Rossas Mota Filho²

RESUMO

Estações de tratamento de esgoto (ETEs) configuram-se como fábricas de produção de água, de nutrientes, energia, entre outros recursos, sendo a qualidade do efluente final determinada pela rota tecnológica adotada assim como das práticas de operação. São nessas unidades que se alcançam os padrões de lançamento dos esgotos tratados em corpos hídricos ou de reúso (urbano, agrícola, industrial, entre outros). Apesar do enorme potencial, há poucas experiências referentes à prática de reúso de água em escala plena. A ausência de uma legislação nacional mais abrangente e específica para reúso configura-se como um dos maiores empecilhos para sua disseminação. Nesta nota técnica (NT), a primeira da coletânea "Reúso não potável de água: Aspectos legais, aproveitamento urbano e agrícola, e tecnologias emergentes para produção de água para reúso", são apresentados os tópicos de interesse relacionados aos aspectos legais, uso agrícola, água cinza tratada em *wetlands* construídos, lagoas de alta taxa, lodo granular aeróbio, membranas dinâmicas pós-reator UASB e sistemas com meio suporte baseado em espuma de poliuretano pós-reator UASB. Com as informações contidas nessa coletânea de NTs, espera-se contribuir para divulgar conhecimentos consolidados por especialistas e prestadores de serviços de saneamento, bem como a produção técnico-científica aplicada ao tema do tratamento de esgoto e reúso de águas.

Palavras-chave: aspectos legais; uso agrícola; água cinza; *wetlands* construídos; lagoas de alta taxa; lodo granular aeróbio; membranas dinâmicas pós-reator UASB; espuma de poliuretano.

ABSTRACT

Sewage treatment plants (STPs) can be considered as factories for the production of water, nutrients, energy, among other resources, and the final effluent quality is determined by the technological route adopted and the operating practices. It is in these units that the standards for discharge of treated sewage into water bodies or reuse (urban, agricultural, industrial, among others) are achieved. Despite the enormous potential, there are few full-scale experiences. The absence of a more comprehensive and specific national legislation for reuse is one of the biggest obstacles to its dissemination. This technical note (TN), the first of the collection "Non-potable water reuse: legal aspects, urban and agricultural use, and emerging technologies for the production of water for reuse", presents the topics of interest related to legal aspects, agricultural use, gray water treated in constructed wetlands, high rate algal ponds, aerobic granular sludge, dynamic membranes post UASB reactor and systems with support medium based on polyurethane foam post UASB reactor. With the information contained in this collection of TNs, it is expected to contribute to the dissemination of consolidated knowledge by experts and sanitation service providers, and technical-scientific production applied to the subject of sewage treatment and water reuse.

Keywords: legal aspects; agricultural use; grey water; constructed wetlands; high rate algal ponds; aerobic granular sludge; dynamic membranes after UASB reactor; polyurethane foam.

¹Engenheiro Civil e Mestre em Engenharia Civil/Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Ceará (UFC). Doutor em Ciências Ambientais pela Universidade de Wageningen, Holanda. Professor Associado do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da UFC. Membro do INCT ETEs Sustentáveis.

²Engenheiro Civil pela UFC. Mestre em Engenharia Ambiental pela University of Nevada, USA. Doutor em Engenharia Ambiental pela North Carolina State University, USA. Professor Associado do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Subcoordenador do INCT ETEs Sustentáveis.

*Endereço para correspondência: Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Campus do Pici, bloco 713. Pici. Fortaleza-CE. CEP: 60455-970. e-mail: andre23@ufc.br

1. INTRODUÇÃO

O esgoto sanitário é uma matriz complexa, que inclui diferentes poluentes ou contaminantes, podendo-se destacar os sólidos grosseiros (removidos usualmente no tratamento preliminar, antes do processo biológico), matéria orgânica e nutrientes (normalmente removidos durante o processo biológico) e microrganismos patogênicos (removidos parcialmente nas diferentes unidades de tratamento ou numa etapa de desinfecção, ao final do sistema de tratamento) (DOS SANTOS, 2019).

A remoção destes poluentes na estação de tratamento de esgoto (ETE) é alcançada a partir das várias operações e processos unitários, como filtração, sedimentação, oxidação biológica etc., ou ao longo de diferentes unidades físicas ou de diferentes ciclos operacionais em uma única unidade. Assim, a escolha das alternativas de processos e tecnologias de tratamento deve levar em consideração vários aspectos: vazão, temperatura, disponibilidade de área, disponibilidade e qualificação da mão de obra, proximidade da ETE a edificações ou áreas comuns, qualidade requerida para o esgoto tratado, recurso disponível para o tratamento em si e para a automação do processo, custos operacionais, demanda por energia e outros insumos, entre outros.

A qualidade requerida para lançamento ou reúso definirá a rota tecnológica da ETE. Incentivos para o reúso de efluentes usualmente avançam à medida que a pressão aumenta pela demanda de água potável. O cenário brasileiro, apesar de rico em recursos hídricos, já apresenta substancial incremento de demanda. Um exemplo no Brasil, é a região metropolitana de São Paulo, que viveu um evento crítico de crise hídrica em 2014 (NOBRE *et al.*, 2016), com subsequente escassez de água, apresentando recordes de déficit no sistema Cantareira, que abastece a capital e vários municípios do seu entorno. No ano de 2021, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) inclusive fez um alerta para a situação crítica de escassez dos recursos hídricos na Região Hidrográfica do Paraná, que abrange parte dos territórios de cinco estados (Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Paraná e São Paulo) (ANA, 2021). O fato é que a estiagem traz dificuldades operacionais para o

abastecimento, inclusive com necessidade de racionar o uso da água, mesmo em estados que possuem uma gestão eficiente em seus mananciais. Portanto, uma vez que o reúso de água é uma importante ferramenta de gestão e planejamento de recursos hídricos, podendo ser incluído como uma fonte alternativa nas matrizes hídricas regionais, cenários de escassez hídrica e de conflitos de usos da água podem ser beneficiados com a sua maior utilização.

Essa coletânea de notas técnicas (NTs), intitulada “Reúso não potável de água: Aspectos legais, aproveitamento urbano e agrícola, e tecnologias emergentes para produção de água para reúso”, tem por objetivo divulgar conhecimentos consolidados por especialistas do setor acadêmico e prestadores de serviços de saneamento, bem como a produção técnico-científica aplicada ao tema do tratamento de esgoto e reúso de água. A contextualização e os tópicos de interesse são discutidos de forma sucinta na presente NT, sendo individualmente detalhados nas NTs subsequentes que integram esta coletânea, como apresentado na **Tabela 1**.

Tabela 1 – Correspondência entre as NTs desta coletânea e os tópicos/técnicas de interesse para o reúso não potável de água.

Tópico de interesse	Nota técnica correspondente
Regulamentação sobre reúso de água	NT 2: Aspectos legais relacionados ao reúso de água como diretriz de institucionalização da prática no Brasil (SANTOS e LIMA, 2022)
Reúso não potável de água para fins agrícolas	NT 3: Uso agrícola - Condições de aplicabilidade de efluente de estações de tratamento de esgoto (MARQUES <i>et al.</i> , 2022)
Água cinza tratada em <i>wetlands</i> construídos	NT 4: Água para reúso: água cinza tratada em <i>wetlands</i> construídos (PAULO <i>et al.</i> , 2022)
Tecnologias emergentes de produção de água para reúso	NT 5: Lagoas de alta taxa como opção viável para o tratamento de esgoto sanitário no contexto brasileiro (ROSA-MACHADO <i>et al.</i> , 2022)
	NT 6: Aplicabilidade da tecnologia lodo granular aeróbio no contexto brasileiro (ROLLEMBERG <i>et al.</i> , 2022)
	NT 7: Aplicabilidade da filtração em membrana dinâmica para o pós-tratamento de efluentes de reatores UASB (BATISTA <i>et al.</i> , 2022)
	NT 8: Aplicabilidade de meio suporte baseado em espuma de poliuretano para sistemas utilizados no pós-tratamento de efluentes anaeróbios (ALMEIDA <i>et al.</i> , 2022)

2. EVOLUÇÃO DA REGULAMENTAÇÃO SOBRE REÚSO DE ÁGUA

Além do enquadramento dos corpos receptores e dos padrões de lançamento de efluentes, estabelecidos em nível federal pelas Resoluções do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) n° 357, de 17 de março de 2005 (BRASIL, 2005) e n° 430, de 13 de maio de 2011 (BRASIL, 2011), há órgãos ambientais estaduais que estão estudando e propondo padrões de qualidade de efluentes tratados para reúso não potável, legalizando, assim, mais uma ferramenta importante na gestão de recursos hídricos.

Segundo Mota *et al.* (2007), a água de reúso constitui uma medida efetiva de controle da poluição da água e uma alternativa para o aumento da oferta de água em regiões carentes de recursos hídricos. Desse modo, o reúso de água planejado torna-se uma prática importante para a diminuição da exploração de mananciais e, conseqüentemente, para a redução da demanda de água bruta, na medida em que muitos dos usos podem ser realizados com uma água de qualidade inferior.

Conforme Hespanhol (2003), cabe, entretanto, institucionalizar, regulamentar e promover o reúso de água no país, fazendo com que a prática se desenvolva de acordo com princípios técnicos adequados e seja economicamente viável, socialmente aceita e segura, em termos de preservação ambiental. Dessa forma, é necessária uma legislação em nível federal que oriente o estabelecimento das legislações estaduais e/ou municipais sobre padrões de reúso, visando uma uniformização de parâmetros e padrões, sendo respeitadas as singularidades locais e que assegure a qualidade físico-química e microbiológica.

A regulamentação da prática de reúso no mundo teve início em 1918 na Califórnia (EUA), considerando a aplicação de efluentes tratados em culturas não consumidas cruas (ANGELAKIS *et al.*, 2018; SHOUSHARIAN e NEGAHBAN-AZAR, 2020). A Organização Mundial de Saúde (OMS) publicou suas primeiras diretrizes relacionadas ao reúso de água para irrigação em 1973, e em 2006 publicou suas diretrizes para o reúso de água na agricultura (OMS, 2016). Em 2017, com base na metodologia *Quantitative Microbiological Risk Assessment* (QMRA) ou Avaliação Quantitativa de Risco

Microbiológico (AQRM), a OMS estabeleceu um guia para produzir água potável a partir do reúso (OMS, 2017).

Os primeiros estados do Brasil que incluíram a possibilidade e critérios para o reúso foram a Bahia (2010), Ceará (2017), São Paulo (2017), Minas Gerais (2020) e Rio Grande do Sul (2020) (SANTOS *et al.*, 2020).

Diante das experiências adquiridas, da evolução das tecnologias capazes de produzir água de melhor qualidade e do aumento da demanda para usos cada vez mais nobres, as regulações foram sofrendo atualizações no sentido de apresentarem padrões mais restritivos, para usos mais nobres como o uso potável (**Figura 1**). A NT 2 desta coletânea (SANTOS e LIMA, 2022) traz inicialmente uma evolução geral da regulamentação sobre reúso de água. Em seguida, apresenta uma evolução do quadro regulatório sobre essa prática no Brasil, assim como os critérios adotados no cenário nacional separados por categorias agrícola, urbano, industrial e aquícola.

3. REÚSO NÃO POTÁVEL DE ÁGUAS PARA FINS AGRÍCOLAS

O uso de efluente de ETE na agricultura é uma valiosa fonte de nutrientes para plantas, possibilitando a redução de adubos minerais em cultivos agrícolas (KIHILA *et al.*, 2014), além de suprir parte das suas necessidades hídricas. Adicionalmente, o efluente se configura como uma fonte de água disponível durante todo o ano, de grande importância em regiões de baixa pluviometria ou com deficiências de distribuição de chuva ao longo do ano.

Como abordado anteriormente, o Brasil enfrenta sérios problemas de escassez de água, sendo importante a adoção de algumas estratégias que aumentem a sua oferta. Neste contexto, surge o interesse pelo aproveitamento de efluente de ETE na agricultura. No entanto, para que essa prática seja vantajosa tanto do ponto de vista econômico, quanto sob a segurança ambiental e de saúde pública, é preciso que tal efluente seja submetido a algum tipo de tratamento que o adeque para o uso agrícola, além da adoção de medidas associadas à aplicação e manejo que contribuam para a minimização dos riscos sanitários. O aproveitamento agrícola depende da avaliação sistêmica de diversos fatores, sumarizados na **Figura 2**.

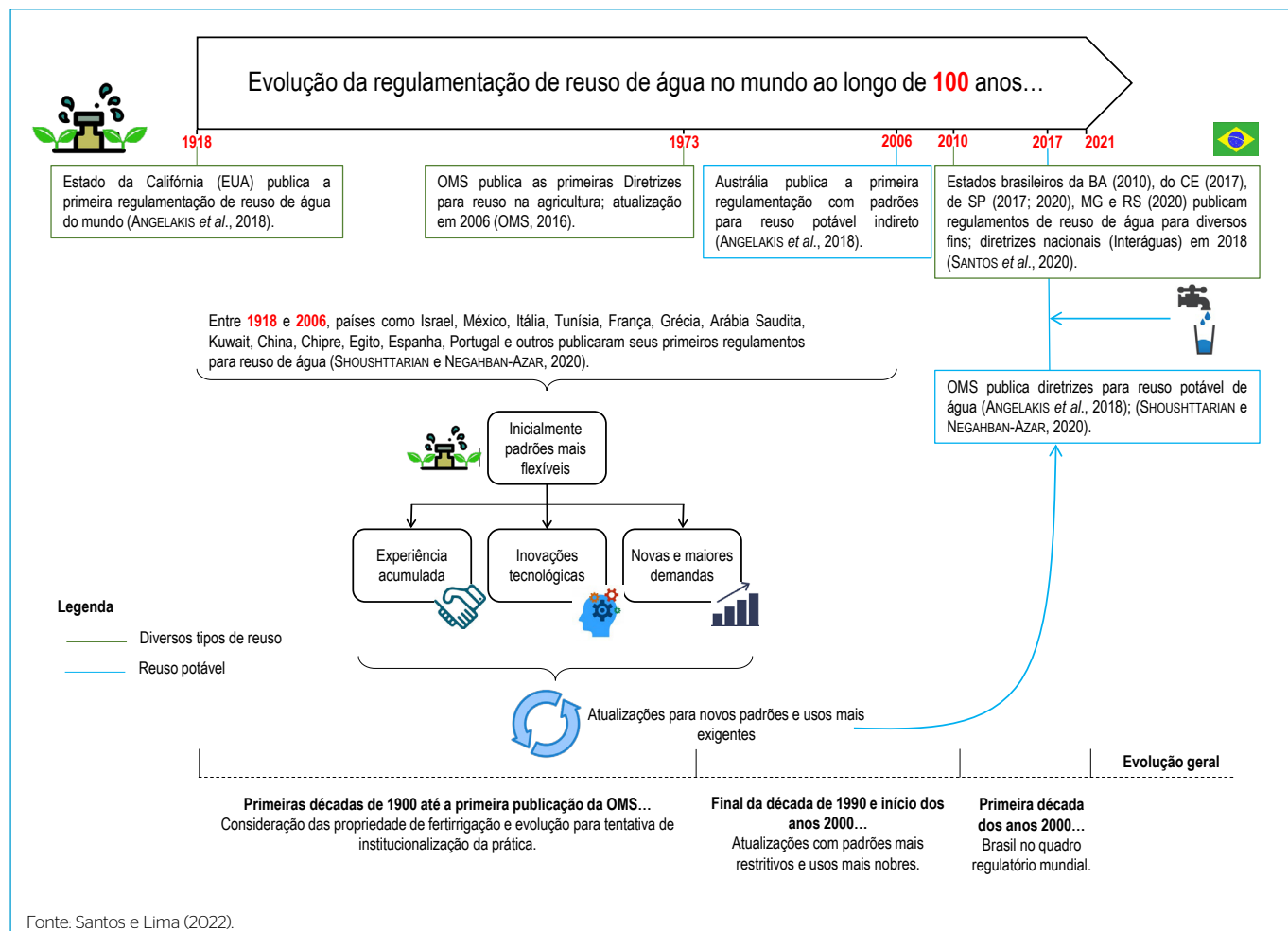


Figura 1 – Representação esquemática da evolução da regulamentação de reúso de água no mundo.

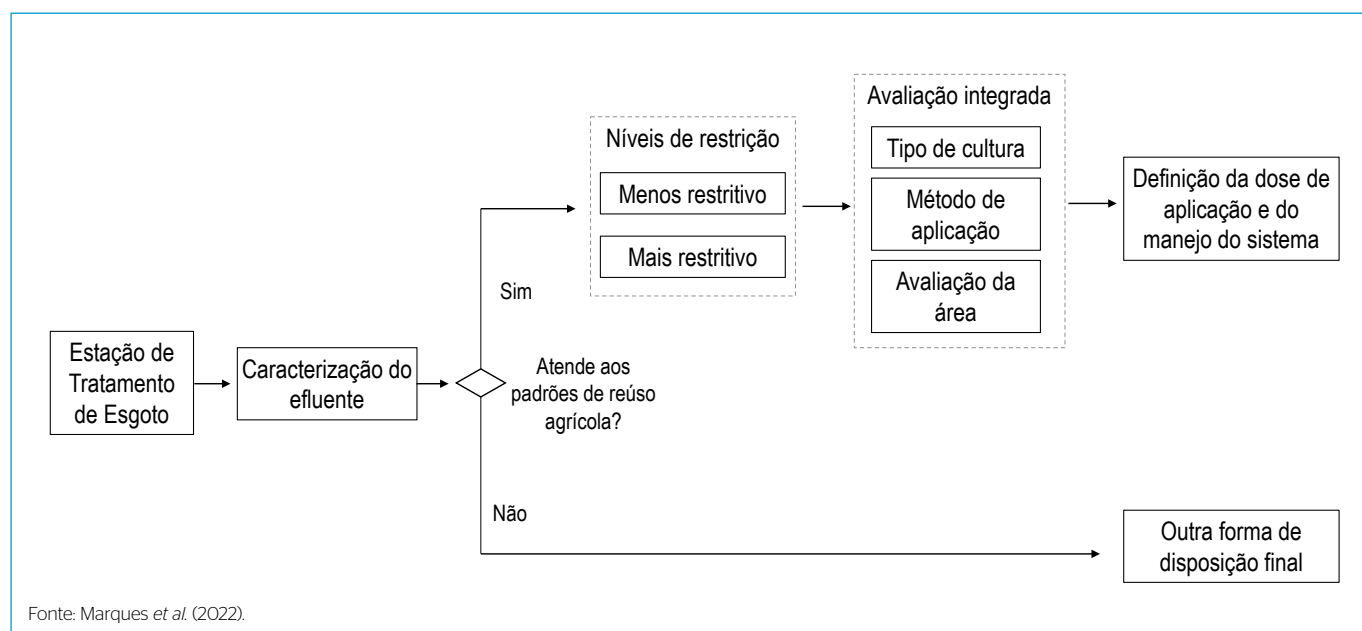


Figura 2 – Fluxograma geral com as principais etapas associadas ao uso agrícola de efluente de ETE.

A NT 3 desta coletânea (MARQUES *et al.*, 2022) discute os dados de qualidade físico-química e microbiológica de efluente de ETE para uso agrícola. Apresenta também alguns critérios para a escolha da área e culturas recomendadas, para a definição da forma de aplicação (fertirrigação) de efluente de ETE na agricultura, assim como da dose de aplicação dos efluentes sanitários. Outros aspectos relevantes são discutidos, como o nível necessário de tratamento do esgoto para o reúso, uma análise do solo e manejo do sistema, bem como o uso integrado de biossólido e efluente de ETE em áreas agrícolas. Por fim, alguns exemplos de aplicação são apresentados.

4. ÁGUA CINZA TRATADA EM WETLANDS CONSTRUÍDOS

Um dos pilares do conceito de saneamento voltado para a recuperação de recursos é a separação das correntes que compõem o esgoto sanitário. Trata-se da separação próxima da fonte de geração da urina, das fezes e da água cinza (AC). A AC é definida como toda a água residuária gerada em uma residência, exceto as frações provindas da bacia sanitária e mictórios, e que representa em torno de 60 a 80% do esgoto doméstico (ERIKSSON *et al.*, 2002). Ela é considerada como fonte potencial de água de reúso, em particular em áreas urbanas, por sua disponibilidade *in loco*.

A coleta segregada da AC requer que a edificação possua uma rede coletora de águas residuárias duplicada: uma para águas fecais, provenientes da bacia sanitária, e outra para a AC. A rede de coleta de águas fecais conecta-se à ETE, enquanto a rede de coleta de AC conecta-se à estação de tratamento de água cinza (ETAC). Após a ETAC, a água de reúso é bombeada para um segundo reservatório (caixa d'água), a partir do qual pode alimentar as bacias sanitárias e/ou ser usada na rega de jardins, limpeza de áreas comuns etc. Um outro detalhe importante é que o reúso pode ser praticado somente quando desejado, pois o sistema de alimentação das bacias sanitárias pode também ser conectado ao reservatório de água potável da edificação.

A justificativa para adoção dessa configuração de separação de correntes e tratamento está no fato de que a AC pode ser tratada mais facilmente na produção de água para reúso. Ademais, possuem menores concentrações de matéria orgânica, óleos e graxas e microrganismos

patogênicos do que as águas fecais. A recuperação de nutrientes e de biogás é interessante sob o ponto de vista econômico apenas em situações muito específicas, pois a AC normalmente é bastante diluída em termos de matéria orgânica e nutrientes.

Para o reúso individual ou coletivo (edificações uni ou multifamiliares), a AC tratada pode ser aplicada para diversos fins, como por exemplo: descarga da bacia sanitária, lavagem de piso e de veículos, irrigação, paisagismo e controle de poeira, entre outros. Porém, é importante destacar que o padrão de qualidade requerido, físico-químico e microbiológico, depende da aplicação. No Brasil, ainda não há uma legislação específica, de abrangência nacional, com a abordagem de padrões de qualidade de água para fins de reúso (SANTOS *et al.*, 2020). Em 2019, foi publicada a Norma Brasileira (NBR) 16.783/2019 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2019) sobre o uso de fontes alternativas de água não potável em edificações, onde a AC está contemplada entre as possíveis fontes de produção de água não potável.

Soluções baseadas na natureza (NBS, do inglês *nature-based solutions*) são técnicas que reproduzem os processos naturais em paisagens urbanas, inclusive na gestão de efluentes, com baixo consumo de energia e sem a necessidade de produtos químicos (BOANO *et al.*, 2020). Diferentes tipos de NBS vêm sendo implementadas para o tratamento de AC, sendo, principalmente, os *wetlands* construídos (CWs, do inglês *constructed wetlands*) e, mais recentemente, telhados e paredes verdes. Os CW possuem um alto potencial ecológico e baixo custo de ciclo de vida, sendo amplamente pesquisado e aplicado no tratamento de AC (ARDEN e MA, 2018).

A NT 4 desta coletânea (PAULO *et al.*, 2022) traz inicialmente os padrões de qualidade para o reúso de AC e dados de caracterização qualitativa e quantitativa da AC. Em seguida, apresenta o detalhamento sobre o tratamento de AC em CW, em termos de configurações, meio filtrante (substrato), plantas e aspectos construtivos, uma análise sobre a relação entre as diferentes configurações, a escolha do CW e desempenho, assim como os principais parâmetros de projeto. Por fim, são apresentadas algumas experiências empregando CW no tratamento de AC.

5. TECNOLOGIAS EMERGENTES DE PRODUÇÃO DE ÁGUA PARA REÚSO

A reversão do enorme déficit que o Brasil apresenta em relação ao tratamento de esgoto depende de vultosos investimentos em despesas de capital (CAPEX, do inglês *capital expenditure*) para implantação de sistemas de esgotamento sanitário, bem como em despesas relativas à respectiva operação e manutenção (OPEX, do inglês *operational expenditure*) desses sistemas. As diferentes operações e processos que perfazem a tecnologia de tratamento de esgoto distinguem-se em função de seus propósitos, dos mecanismos em que se baseiam, da tipologia do reator que empregam, do respectivo grau de mecanização etc.

Atualmente existem diversas tecnologias de tratamento de esgoto utilizadas no Brasil. A diversidade dessas rotas tecnológicas se deve a um conjunto de fatores, tais como: variação da composição do esgoto gerado, destino do efluente tratado, questões socioeconômicas, aspectos climáticos, disponibilidade de área, proximidade da ETE a aglomerados urbanos, custos de implantação, operação e manutenção, entre outros (DOS SANTOS, 2019).

Segundo levantamento realizado pela ANA, cerca de 37% das ETEs no Brasil empregam reatores anaeróbios em seu fluxograma de tratamento, destacando que o país detém o maior parque de reatores anaeróbios do mundo (ANA, 2021). Nesse contexto, atenção especial é dada aos reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodo (reatores UASB, do inglês *upflow anaerobic sludge blanket reactor*), que devido a uma série de vantagens (p. ex.: elevada concentração de biomassa, baixa demanda de área, baixo custo de implantação e operação, ausência de consumo de energia elétrica no reator e geração de biogás), têm sido amplamente utilizados em ETEs do país.

No entanto, algumas limitações de desempenho desses reatores em relação à remoção de matéria orgânica, nutrientes e patógenos têm inviabilizado o uso isolado da tecnologia, sendo necessária uma etapa de pós-tratamento que confira ao efluente uma qualidade suficiente para lançamento em corpos de água, mesmo em termos de demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO), ou até mesmo quando o objetivo principal é o reúso.

Em geral, a totalidade dos volumes das unidades, a dimensão total da área requerida, os requisitos de energia elétrica e de insumos, e a geração específica de lodo, constituem as principais variáveis para estimação do CAPEX e OPEX envolvidos. Requisitos de automação, complexidade de controle e operação, impactos ambientais circunvizinhos à ETE e experiência e domínio sobre a tecnologia servem também como argumentos para o melhor embasamento da seleção de uma determinada rota tecnológica.

Em um cenário de constantes avanços de conhecimento e tecnológicos, várias opções de tratamento surgiram nos últimos 10-20 anos, sendo outras grandemente aperfeiçoadas para o aumento das remoções dos constituintes presentes nos esgotos, e para a diminuição dos custos de investimento e operacionais. Dentro desse rol de tecnologias, são destacadas as lagoas de alta taxa (LAT), lodo granular aeróbio (LGA), membranas dinâmicas pós-reator UASB e sistemas com meio suporte baseado em espuma de poliuretano pós-reator UASB.

As lagoas de alta taxa (LAT) surgem como uma opção de tecnologia sustentável de pós-tratamento, pois possibilitam a remoção da matéria orgânica e de outros compostos juntamente com a produção de biomassa microalgal, com baixos custos de operação quando comparadas a outras tecnologias. A biomassa produzida pode ser aproveitada para a produção de bioprodutos, como o biogás, rações e fertilizantes. As LATs também removem patógenos, produzindo efluente apto para reúso, além de requerer menor área, quando comparadas aos sistemas de lagoas facultativas. A NT 5 desta coletânea (ROSA-MACHADO *et al.*, 2022) traz inicialmente uma contextualização do panorama do tratamento de esgoto no Brasil, demonstrando a possibilidade real de aplicação de LAT no contexto brasileiro. Em seguida, é realizada uma comparação de custos e requerimento por área para o tratamento de esgoto sanitário por diferentes tecnologias, assim como são discutidos os fundamentos da LAT e de outros fotobiorreatores. Também são apresentados os critérios de dimensionamento e condições operacionais de LAT, separação e recuperação da biomassa produzida e níveis de eficiência alcançados. Por fim, são apresentadas as diferentes opções de recuperação de recursos e o fechamento de ciclos nesses sistemas.

Já a tecnologia de lodo granular aeróbio (LGA) é atualmente considerada uma das mais promissoras para o tratamento biológico de esgoto, principalmente em sistemas de grande porte, especialmente em situações em que há necessidade de obtenção de efluente tratado com elevada qualidade, ou mesmo em situações de baixa disponibilidade de área. Devido à possibilidade de remoção combinada de matéria orgânica e nutrientes (nitrogênio - N e fósforo - P) em um mesmo reator, dispensando o uso de decantadores secundários, a tecnologia LGA se configura como uma das mais compactas no mercado, demonstrando também a possibilidade de economia de energia elétrica em relação a outras tecnologias aeróbias como lodo ativado. No entanto, há vários relatos de problemas, incluindo: (i) instabilidade da biomassa granular; (ii) longos períodos de partida dos reatores em função do lento processo de formação dos grânulos, especialmente quando se utiliza esgoto com baixa concentração de matéria orgânica; (iii) acúmulo de nitrito no efluente final; (iv) elevada automação do sistema; e (v) processos operacionais ainda não completamente estabelecidos. Dessa forma, apesar dos consideráveis avanços no âmbito do tratamento de esgoto em ETEs adotando essa tecnologia, é necessária uma avaliação integrada sobre sua aplicação no Brasil. Assim, a **NT 6** desta coletânea (ROLLEMBERG *et al.*, 2022) traz inicialmente um conjunto de informações acerca do desenvolvimento, características e aplicação da tecnologia LGA. Em seguida discute-se aspectos sobre a operação de reatores LGA, requisitos para implantação e operação (CAPEX e OPEX), e vantagens associadas. Adicionalmente, são apresentados os desafios técnico-operacionais para sua aplicação, notadamente em relação a requisitos quanto à eficiência do tratamento preliminar, estabilidade dos grânulos em longos períodos de operação, procedimentos de descarte e requisitos de tratamento do lodo, requisitos de automação e controle, e partida do sistema. Por fim, faz-se uma análise crítica sobre os principais cenários de aplicação.

Apesar das inúmeras vantagens dos reatores UASB para o tratamento de esgoto em nosso país, a depender dos requisitos de qualidade do efluente final, uma etapa de pós-tratamento pode ser necessária. Diversas tecnologias têm sido consideradas no pós-tratamento de efluentes de

reatores anaeróbios. Para a maior parte delas, há a necessidade de um rigoroso gerenciamento do lodo no reator anaeróbio. Uma alternativa de pós-tratamento emergente faz uso de membranas dinâmicas (MD) para filtração do efluente. Nas MDs, a remoção de poluentes ocorre majoritariamente devido a uma camada dinâmica de sólidos que se acumula na superfície de uma malha de suporte. A sua principal vantagem é que há a possibilidade de utilização de materiais suporte de baixo custo. Em relação à localização das MDs, existe a possibilidade de uso na forma submersa ou externa ao reator anaeróbio. Existem algumas diferenças e semelhanças entre as mesmas e a filtração com membrana de microfiltração tradicional (MF), sendo destacados dois aspectos: (i) tamanho de poro da membrana/material de suporte entre 0,05 e 10 μm para as MF e de 10 a 200 μm para as MDs; e (ii) principais materiais: cerâmica, polipropileno (PP), polissulfona (PS), polifluoreto de vinilideno (PVDF), polietersulfona (PES) para as MF, ao passo que para as MD são utilizados material de menor custo como o polietileno tereftalato (PET), poliéster, nylon e polipropileno (PP). A **NT 7** desta coletânea (BATISTA *et al.*, 2022) tem por objetivo apresentar fundamentos e aspectos práticos desta tecnologia emergente, tendo em vista o seu elevado potencial de aplicação para a melhoria da qualidade de efluentes de reatores UASB. Para tanto, são discutidos a aplicabilidade e limitações da tecnologia, os fundamentos do processo, assim como os critérios de dimensionamento mais importantes. Por fim, são apresentados os principais aspectos relacionados à operação e manutenção, assim como um estudo de caso.

A aplicação de sistemas com biofilme utilizando meio suporte baseado em espuma de poliuretano é uma alternativa para a melhoria da qualidade do efluente de reatores anaeróbios. A principal vantagem associada ao uso da espuma como meio suporte reside no potencial de retenção de biomassa e elevação da idade do lodo, favorecendo a respiração endógena e atividade de predação biológica. A depender das condições operacionais impostas, a remoção de compostos nitrogenados é também observada com o uso deste tipo de meio suporte, para além do bom desempenho na remoção de matéria orgânica. A **NT 8** desta coletânea (ALMEIDA *et al.*, 2022) apresenta inicialmente

os fundamentos gerais sobre sistemas com biofilmes, com ênfase em meios suporte baseados em espuma de poliuretano, os quais vêm sendo aplicados com sucesso em filtros biológicos percoladores (FBP), biorreator combinado anaeróbio-aeróbio de leito fixo (BRC), incorporado a processos de lodos ativados, entre outros. Em seguida, são reportadas algumas experiências em escala plena com tecnologias emergentes que utilizam espuma de poliuretano como meio de enchimento. Adicionalmente apresenta-se o desempenho de reatores com espuma de poliuretano e condições operacionais usualmente impostas. Por fim, é apresentada uma análise crítica sobre custos de implantação e de operação, e vantagens e desvantagens associadas.

Na **Tabela 2** é apresentada uma comparação entre as principais tecnologias de tratamento biológico empregadas no Brasil, avaliando os aspectos de desempenho (eficiência) e de demanda de recursos (área, CAPEX, OPEX etc.), considerando um tratamento de esgoto sanitário de média carga.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A reversão do enorme déficit que o Brasil apresenta em sistemas de tratamento de esgoto demanda elevados investimentos. As diferentes operações e processos que perfazem a tecnologia de tratamento de esgoto distinguem-se em função de seus propósitos, dos mecanismos em que se baseiam, da tipologia do reator que empregam, do respectivo grau de mecanização etc. Muitas destas tecnologias são consideradas emergentes, tanto para serem utilizadas de maneira isolada (p. ex.: o lodo granular aeróbio), quanto para serem incorporadas a uma tecnologia já consolidada como o reator UASB (p. ex.: uso de membranas dinâmicas), ou, ainda, para melhorarem a remoção de constituintes e estabilidade do processo durante o pós-tratamento de reatores anaeróbios (lagoas de alta taxa, membranas dinâmicas e sistemas com biofilmes). No tocante ao tratamento de água cinza, os *wetlands* construídos configuram-se como as mais promissoras e consolidadas entre as soluções baseadas na natureza.

Tabela 2 – Valores típicos de eficiências de tratamento de esgoto de sistemas biológicos convencionais e emergentes.

Sistema	Qualidade média efluente (concentrações mg·L ⁻¹)					Eficiências (%)		
	DQO	NH ₄ ⁺	N-total	P-total	SST	DQO	N-total	P-total
Lagoa de alta taxa (LAT)	110 a 180	< 5	> 15	> 5	80 a 120	65 a 75	< 30	< 35
LAT + Decantador	90 a 120	< 5	> 15	> 4	60 a 90	75 a 85	< 35	< 40
UASB + LAT ⁽¹⁾	100 a 150	10 a 15	> 20	> 3	100 a 130	60 a 80	< 40	< 50
UASB + LAT + Decantador	80 a 100	< 10	> 20	> 3	70 a 100	80 a 90	< 45	< 55
Lodo granular aeróbio	< 30	< 5	< 5	< 2	0 a 20	90 a 99	> 90	> 75
UASB + Membrana dinâmica	60 a 100	> 15	> 20	> 4	10 a 20	60 a 90	< 60	< 35
Reator UASB + FBP-espuma (remoção de matéria orgânica) ⁽²⁾	60 a 90	> 15	> 20	> 4	30 a 50	75 a 85	-	-
Reator UASB + FBP-espuma (remoção de NH ₄ ⁺) ⁽²⁾	< 40	< 10	> 15	> 4	< 25	> 85	30 a 65	< 35
UASB + LA	60 a 150	5 a 15	> 20	> 4	20 a 40	75 a 88	< 60	< 35
UASB + FBAS	60 a 150	5 a 15	> 20	> 4	20 a 40	75 a 88	< 60	< 35
UASB + FBP	70 a 180	> 15	> 20	> 4	20 a 40	75 a 88	< 60	< 35
LA convencional	45 a 120	< 5	> 20	> 4	20 a 40	80 a 90	< 60	< 35
LA aeração prolongada	30 a 100	< 5	> 20	> 4	20 a 40	83 a 93	< 60	< 35
LA batelada	30 a 100	< 5	> 20	> 4	20 a 40	83 a 93	< 60	< 35
LA convencional com remoção biológica de N	45 a 120	< 5	< 10	> 4	20 a 40	80 a 90	> 75	< 35
LA convencional com remoção biológica de N e P	45 a 120	< 5	< 10	1 a 2	20 a 40	80 a 90	> 75	> 75
MBR Aeróbio	< 30	< 5	1 a 4	2 a 5	0 a 5	90 a 95	> 75	> 70

Legenda: LAT - Lagoa de alta taxa; LGA - Lodo granular aeróbio; UASB - Reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo; LA - Lodos ativados; FBAS - Filtro biológico aerado submerso; FBP - Filtro biológico percolador; MBR - Biorreatores de membrana; DQO - Demanda química de oxigênio; NH₄⁺ - Nitrogênio amoniacal; N-total - Nitrogênio total; P-total - Fósforo total; SST - Sólidos suspensos totais.

Notas: ⁽¹⁾Qualidade do efluente e desempenho sem o uso de decantadores secundários (VASSALLE *et al.*, 2020). ⁽²⁾Qualidade do efluente e desempenho sem o uso de decantadores secundários (ALMEIDA *et al.*, 2022).

Fonte: von Sperling (2014); Nereda (2017).

O objetivo principal é tornar as ETEs de correntes segregadas ou não segregadas cada vez mais eficientes e confiáveis para o cumprimento de requisito legal de lançamento ou produção de água para reúso. Ademais, é importante que as referidas ETEs tenham idealmente baixos custos de implantação, operação e manutenção.

Em relação ao reúso de água, apesar da evolução geral da regulamentação no Brasil e no mundo, o país conta atualmente com uma base legal insatisfatória para a sistematização dessa prática. Os principais aspectos levantados para a elaboração de uma regulamentação da prática de reúso são: a abordagem das tipologias de reúso alinhadas aos padrões compatíveis com as tecnologias de tratamento de esgoto de amplo domínio da engenharia e da capacidade de pagamento dos usuários no território nacional, entre outras.

Com as informações contidas nessa coletânea de NTs, espera-se contribuir para divulgar conhecimentos

consolidados por especialistas e prestadores de serviços de saneamento, bem como a produção técnica-científica aplicada ao tema do tratamento de esgoto e reúso de águas. Incentiva-se os profissionais interessados nesta temática a aprofundarem seus conhecimentos por meio do conteúdo apresentado nas outras sete partes (NTs 2 a 8) que integram esta coletânea.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio recebido do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG, e do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estações Sustentáveis de Tratamento de Esgoto – INCT ETEs Sustentáveis.

Este trabalho faz parte da série de publicações do INCT ETEs Sustentáveis

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Norma Brasileira - NBR 16783: *Uso de fontes alternativas de água não potável em edificações*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019. 19 p.

ALMEIDA, P. G. S.; BRESSANI-RIBEIRO, T.; ARAÚJO JUNIOR, M. M.; CHERNICHARO, C. A. L. Reúso não potável de água: Aspectos legais, aproveitamento urbano e agrícola, e tecnologias emergentes para produção de água para reúso. Nota Técnica 8 - Aplicabilidade de meio suporte baseado em espuma de poliuretano para sistemas utilizados no pós-tratamento de efluentes anaeróbios. *Cadernos Técnicos Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 2, n. 3, p. 99-110, 2022.

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. *ANA declara situação crítica de escassez quantitativa dos recursos hídricos da Região Hidrográfica do Paraná*. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/noticias-e-eventos/noticias/ana-declara-situacao-de-escassez-quantitativa-dos-recursos-hidricos-da-regiao-hidrografica-do-parana>. Acesso em 25 de julho de 2021.

ANGELAKIS, A. N.; ASANO, T.; BAHRI, A.; JIMENEZ, B. E.; TCHOBANOGLIOUS, G. Water Reuse: From ancient to modern times and the future. *Frontiers Environmental Science*, v. 6, n. 26, 2018.

ARDEN, S.; MA, X. Constructed wetlands for greywater recycle and reuse: A review. *Science of the Total Environment*, v. 630, p. 587-599, 2018.

BATISTA, I. F.; CENTENO-MORA, E. J.; FONSECA, P. R. S.; PASSOS, F.; CHERNICHARO, C. A. L. Reúso não potável de água: Aspectos legais, aproveitamento urbano e agrícola, e tecnologias emergentes para produção de água para reúso. Nota Técnica 7 - Aplicabilidade da filtração em membrana dinâmica para o pós-tratamento de efluentes de reatores UASB. *Cadernos Técnicos Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 2, n. 3, p. 85-98, 2022.

BOANO, F.; CARUSO, A.; COSTAMAGNA, E.; RIDOLFI, L.; FIORE, S.; DEMICHELIS, F.; GALVÃO, A.; PISOEIRO, J.; RIZZO, A.; MASI, F. A review of Nature-Based Solutions for greywater treatment: Applications, hydraulic design, and environmental benefits. *Science of The Total Environment*, v. 711, p. 134731, 2020.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA n° 430, de 13 de Maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, completa e altera a Resolução n° 357, de março de 2005. Brasília, DF, 2011.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília, DF, 2005.

DOS SANTOS, A. B. *Caracterização, tratamento e gerenciamento de subprodutos de correntes de esgotos segregadas e não segregadas em empreendimentos habitacionais*. Fortaleza, Brasil: Impreco, 2019. 812 p.

ERIKSSON, E.; AUFFARTH, K.; HENZE, M.; LEDIN, A. Characteristics of grey wastewater. *Urban Water*, v. 4, p. 85-104. 2002.

HESPAHOL, I. Potencial de reúso de água no Brasil: agricultura, indústria, municípios, recarga de aquíferos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 7, n. 4, p. 75-95. 2003.

KIHILA, J.; MTEI, K. M.; NJAU, K. N. Wastewater treatment for reuse in urban agriculture; the case of Moshi Municipality, Tanzania. *Physics and Chemistry of the Earth*, v. 72, p. 104-110, 2014.

MARQUES, M. V. A.; CHAMHUM-SILVA, L. A.; MATOS, A. T.; BOMFIM, N. F.; BARROS, K. K.; BASTOS, R. K. X.; KATO, M. T. Reúso não potável de água: Aspectos legais, aproveitamento urbano e agrícola, e tecnologias emergentes para produção de água para reúso. Nota Técnica 3 - Uso agrícola: Condições de aplicabilidade de efluente de estações de tratamento de esgoto. *Cadernos Técnicos Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 2, n. 3, p. 29-41, 2022.

MOTA, S.; AQUINO, M. D.; SANTOS, A. B (org.). *Reúso de águas em irrigação e piscicultura*. Fortaleza, Brasil: UFCE, 2007. 350 p.

NEREDA. *Aerobic Granular Sludge Demonstration*. BACWA, Netherlands, 2017. Disponível em: <https://bacwa.org/wp-content/uploads/2017/04/BACWA-AECOM-March-17th-2017-Nereda-Demonstration-Opportunity-3.pdf>.

NOBRE, C.; MARENGO, J. A.; SELUCHI, M. E.; CUARTAS, A.; ALVES, L. M. Some characteristics and impacts of the drought and water crisis in southeastern Brazil during 2014 and 2015. *Journal of Water Resource and Protection*, v. 8, p. 252-262, 2016.

OMS. Organização Mundial de Saúde. *Potable reuse: Guidance for producing safe drinking-water*. Geneva, Switzerland: World Health Organization. 2017. 152 p.

OMS. Organização Mundial de Saúde. *Quantitative microbial risk assessment: application for water safety management*. Geneva, Switzerland: World Health Organization. 2016. 187 p.

PAULO, P. L.; VIEIRA, J.; TAKAHASHI, K. M.; MAGALHÃES FILHO, F. J. C.; SILVA, J. B.; BONCZ, M. A. Reúso não potável de água: Aspectos legais, aproveitamento urbano e agrícola, e tecnologias emergentes para produção de água para reúso. Nota Técnica 4 - Água para reúso: água cinza tratada em *wetlands* construídos. *Cadernos Técnicos Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 2, n. 3, p. 43-58, 2022.

ROLLEMBERG, S. L. S.; VOLSCHAN JUNIOR, I.; BASSIN, J. P.; PIVELLI, R. P.; SANTOS, M. L. F.; MAGNUS, B. S.; dos SANTOS, A. B. Reúso não potável de água: Aspectos legais, aproveitamento urbano e agrícola, e tecnologias emergentes para produção de água para reúso. Nota Técnica 6 - Aplicabilidade da tecnologia lodo granular aeróbio no contexto brasileiro. *Cadernos Técnicos Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 2, n. 3, p. 73-83, 2022.

SANTOS, A. S. P.; LIMA, M. A. M. Reúso não potável de água: Aspectos legais, aproveitamento urbano e agrícola, e tecnologias emergentes para produção de água para reúso. Nota Técnica 2 - Aspectos legais relacionados ao reúso de águas como diretriz de institucionalização da prática no Brasil. *Cadernos Técnicos Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 2, n. 3, p. 15-27, 2022.

SANTOS, A. S. P.; GONÇALVES, R. F.; MELO, M. C.; LIMA, M. A. M.; ARAUJO, B. M. Uma análise crítica sobre os padrões de qualidade de água de uso e de reúso no Brasil. *Sustinerere: Revista de Saúde e Educação*, v. 8, n. 2, p. 437-482, 2020.

ROSA-MACHADO, A. T.; VASSALLE, L.; TORRES-FRANCO, A. F.; SANTOS, M. L. F.; MOTA FILHO, C. R. Reúso não potável de água: Aspectos legais, aproveitamento urbano e agrícola, e tecnologias emergentes para produção de água para reúso. Nota Técnica 5 - Lagoas de alta taxa como opção viável para o tratamento de esgoto doméstico no contexto brasileiro. *Cadernos Técnicos Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 3, n. 1, p. 59-71, 2022.

SHOUSHTARIAN, F.; NEGAHBAN-AZAR, M. Worldwide regulations and guidelines for agricultural water reuse: A critical review. *Water*, v. 12, n. 4, p. 971, 2020.

VASSALLE, L.; DÍEZ-MONTERO, R.; MACHADO, A.T.R.; MOREIRA, C.; FERRER, I.; MOTA, C.R.; PASSOS, F.. Upflow anaerobic sludge blanket in microalgae-based sewage treatment: Co-digestion for improving biogas production. *Bioresource Technology*, v. 300, p. 122677, 2020.

von SPERLING, M. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. 4ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 2014. 472 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuais, v. 1)