



CAROLINE RODRIGUES PROCK

**DESEMPENHO DE SISTEMAS ALAGADOS CONSTRUÍDOS
NA REMOÇÃO DE COMPOSTOS EMERGENTES: UMA
REVISÃO**

**LAVRAS - MG
2022**

CAROLINE RODRIGUES PROCK

**Desempenho de Sistemas Alagados Construídos na remoção de compostos emergentes:
uma revisão**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal de
Lavras (UFLA), como parte das exigências
do curso de Engenharia Ambiental e
Sanitária, para o título de Bacharel.

Prof^ª. Dra. Fátima Resende Luiz Fia
Orientadora

Msc. Mateus Henrique Barbosa
Coorientador

**LAVRAS – MG
2022**

CAROLINE RODRIGUES PROCK

**DESEMPENHO DE SISTEMAS ALAGADOS CONSTRUÍDOS NA REMOÇÃO DE
COMPOSTOS EMERGENTES: UMA REVISÃO**

**PERFORMANCE OF FLOODED SYSTEMS BUILT IN REMOVING EMERGING
COMPOUNDS: A REVIEW**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal de
Lavras (UFLA), como parte das exigências
do curso de Engenharia Ambiental e
Sanitária, para o título de Bacharel.

APROVADA em 28 de março de 2022

Prof. Dr. Jacineumo Falcão de Oliveira

Msc. Débora Ester dos Santos Fialho

Prof^a. Dra. Fátima Resende Luiz Fia

Orientadora

Msc. Mateus Henrique Barbosa

Coorientador

LAVRAS – MG

2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, que nunca me deixou faltar fé e coragem para enfrentar as batalhas do dia a dia, me dando mais do que mereço. À minha mãe, que sempre foi o meu porto-seguro, me dando forças, conselhos, e apoio mental, físico e também financeiro, me tornando quem eu sou. À minha família, pelo amor mais infinito e união incomparável, em especial aos meus irmãos, Fafá, Gabriel e Rafael, pelo companheirismo, admiração e amizade excepcionais, à minha vó Maria, que sempre confiou em mim como ninguém e sei que de onde estiver, está observando meu crescimento e me iluminando; ao meu namorado Marcos, que sempre me deu muito apoio, a minha madrinha Sandra, que deu todo suporte e mostrou seu orgulho, ao trio tia Cida, Luana e Lunna, que sempre tiveram muita parceria, felicidade e motivação, minhas tias, Dani, Letícia e Mara e a meu pai Cláudio, que sempre confiaram grandemente em mim. Aos que já não estão presentes nesse mundo, meu padrinho, avós Celina e Ditinho, tios Alaércio e Urubu, sei que me deram forças quando precisei, e torceram por mim desde meu primeiro minuto de vida. A todos eles, muito obrigada pelo carinho, amor, esperança e confiança depositados em mim.

Agradeço ao Mateus, que me trouxe uma visão para o mundo laboratorial e uma luz para o que poderia me encantar e ser motivo do meu Trabalho de Conclusão. À Fátima, que prontamente me acolheu para ser sua orientada no trabalho, trazendo ideias e buscando soluções, em meio a essa fase tão difícil da pandemia. A banca avaliadora do TCC que aceitaram me avaliar e acrescentar no meu trabalho final.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), que me mostrou um mundo além do que eu podia imaginar, e que me encantou, tendo grande orgulho de me tornar uflaniana, juntamente com todos os discentes e colegas que me ajudaram na formação, compreensão e crescimento do meu caminho profissional.

Agradeço aos meus amigos, Diogo, Janaína, Amanda, Laís, Rafa e Helena, que desde o primeiro dia me apoiaram muito. À segunda família que Lavras me trouxe: a República Ardidás, em especial a Trapaia, Mestre, Maraca, Mingana, Coala, Lola, Dirce, Pifada, Difase e Jénice, que aprendemos juntas a criar uma família totalmente diferente, com muito companheirismo, amor, união, tradição, respeito, amizade, e sermos melhores do que éramos. À República Farol Aceso, que sempre me acolheu muito bem. Aos amigos que a vida universitária me trouxe, e ajudou a tornar essa experiência mais leve.

Agradeço também as minhas experiências profissionais, Crea Minas Júnior - Núcleo Lavras, e AmBev - CDD Varginha, me mostrando que sempre podemos aprender e também ensinar, deixando marcas nas pessoas.

Sou grata a todos que me ajudaram a percorrer o caminho da graduação, e me trouxeram lições, boas e até mesmo as ruins, me tornando uma mulher mais madura e compreensível, pronta para alavancar na vida!

RESUMO

Compostos emergentes são substâncias de origem sintética ou da produção natural, que estão presentes nos mais diversos tipos de efluentes. Por não serem removidos pelos sistemas de tratamento convencionais, são lançados nos corpos d'água e podem apresentar alto potencial de impacto aos ecossistemas, à saúde humana e a qualidade de vida dos seres, principalmente da biota aquática, devido ao alto potencial de toxicidade. A falta de legislação brasileira, que determine limites de concentração nos efluentes tratados, contribuem ainda mais com a presença dessas substâncias no meio ambiente. Esses compostos podem ter várias origens, com destaque para fontes dos efluentes domésticos e industriais e o descarte inadequado. Uma boa alternativa para a o tratamento destes compostos são os Sistemas Alagados Construídos (SACs), pois possuem significativa eficiência na remoção desses compostos, além de oferecer baixo custo de implantação, manutenção e operação. Por esta razão, este trabalho consistiu em realizar uma revisão de literatura, baseado nos dados do portal de Periódicos da CAPES/MEC, com trabalhos científicos que avaliaram SACs na remoção de compostos emergentes. Foram observados diversos compostos emergentes que estão presentes nos efluentes originados de efluente doméstico, entretanto, foram selecionados e analisados 26 compostos, sendo os mais recorrentes nos estudos, os produtos farmacêuticos (remédios), hormônios, estimulantes e desreguladores endócrinos. Os SACs demonstraram eficiências de remoção de compostos emergentes na faixa de 2 a 99%, sendo os principais mecanismos de remoção: biodegradação, sorção e absorção pelas plantas. Os tipos de sistemas que apresentaram melhor remoção foram os que apresentam mais de um sistema acoplados, e o melhor o sistema híbrido, composto por 2 sistemas verticais seguidos de 2 SACs horizontais, apresentando eficiências superiores a 61%. Quanto ao tipo de substrato, o que apresentou as melhores eficiências de remoção foi cascalho, além de ser o mais utilizado, com diâmetro de granulometria variando de 4 a 19mm, e eficiência de remoções variando de 11,5 a 99%. E em relação as espécies cultivadas, os SACs que apresentaram as melhores eficiências de remoção foram os que continham policultura, com eficiências de remoção entre 38 e 99%. Analisando os valores encontrados nas remoções médias dos compostos emergentes, assim como as características construtivas dos mesmos, conclui-se que o uso de SACs, tanto de escoamento horizontal e vertical, assim como os sistemas acoplados e híbridos, demonstraram grande potencial na remoção dos compostos emergentes, ficando comprovado também que a presença de plantas é muito importante para a remoção dos compostos emergentes.

Palavras-chave: Fármacos, desreguladores endócrinos, macrófitas, microcontaminantes emergentes, tratamento de efluentes.

ABSTRACT

Emerging compounds are substances of synthetic origin or naturally produced and that are present in the most diverse types of effluents. As they are not removed by conventional treatment systems, they are released into water bodies and can have a high potential for impacting ecosystems, human health and the quality of life of beings, especially aquatic biota, due to their high potential for toxicity. The lack of Brazilian legislation, which determines concentration limits in treated effluents, contributes even more to the presence of these substances in the environment. These compounds can have various origins, with emphasis on domestic and industrial effluent sources and improper disposal. A great alternative for the treatment of these compounds are the Constructed Wetted Systems (SACs), as they have efficiency in the removal of microcontaminants, in addition to offering low cost of implantation, maintenance and operation. For this reason, this work consisted of a literature review, based on data from the CAPES/MEC Journals portal, with scientific works that evaluated SACs in the removal of emerging compounds. Several emerging compounds that are present in the effluents were observed, however, 26 compounds were selected and analyzed, the most recurrent in the studies, such as pharmaceuticals (medicines), hormones, stimulants and endocrine disruptors. The SACs showed efficiencies of removal of emerging compounds in the range of 2% to 99%, being the main mechanisms of removal: biodegradation, sorption and absorption by plants. The types of systems that showed better removal were those that had more than one coupled system, the main one being the hybrid, with 2 vertical systems followed by 2 horizontal ones, presenting efficiencies greater than 61%. As for the type of substrate, the most used and the one that presented the best removal was gravel, varying in granulometries, with a diameter range from 04 to 19 mm, and removals in the range of 11.5 to 99%. And in relation to cultivated species, the SACs that presented better efficiencies were those that contained polyculture, with removal efficiencies in the range of 38 to 99%. Analyzing the values found in the average removals of the compounds in the Systems, as well as their characteristics, such as type, substrates, surface area, types of cultivated plant species, and pollutants that were treated in them, it is concluded that the use of Constructed Wetted Systems, both horizontally and vertically, showed potential in the removal of microcontaminants, also proving that the presence of plants is very important for the removal of emerging compounds, demonstrating varied efficiencies between the compounds, some with negative removals, and most positive, in the range from 02 to 99%.

Keywords: Drugs, endocrine disruptors, macrophytes, emerging microcontaminants, effluent treatment.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. OBJETIVOS.....	10
2.1. Objetivos específicos	10
3. REFERENCIAL TEÓRICO	11
3.2. Compostos emergentes.....	12
3.2. Risco e impactos na saúde e no meio ambiente.....	13
3.3. Sistemas Alagados Construídos.....	14
3.3. Sistemas Modificados	146
3.5. Aplicação de Sistemas Alagados Construídos na remoção de compostos emergentes	17
4. METODOLOGIA	18
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	19
6. CONCLUSÕES.....	37
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	39

1. INTRODUÇÃO

Houve uma crescente quantidade no consumo de compostos emergentes, e consequentemente nos efluentes, e nos corpos d'água, que são mais agravados, devido a deficiência da legislação brasileira, em estipular limites de concentração nos efluentes tratados, que serão lançados nos corpos hídricos. Compostos emergentes são substâncias de origem sintética ou da produção natural, que podem ser encontrados nos mais diversos tipos de efluentes, e nas águas superficiais, em quantidade traço, como fármacos, hormônios, estimulantes e desreguladores endócrinos (LIMA et al., 2017).

Os desreguladores endócrinos são substâncias químicas exógenas muito utilizadas em indústrias, podendo ser encontradas de forma natural no meio ambiente e, quando presentes em maiores quantidades, podem interferir no sistema endócrino dos seres humanos e, com isso, afetar a saúde, o crescimento e a reprodução dos mesmos (BILA e DEZOTTI, 2007). Os fármacos, constituem substâncias químicas biologicamente ativas sintetizadas, com o intuito de produzir respostas fisiológicas em humanos e animais (LIMA et al., 2017). Já hormônios podem ocorrer tanto na forma sintética, quanto natural, e são utilizados em diversos tratamentos, como de doenças, controle de natalidade e problemas dermatológicos (GUEDES-ALONSO et al., 2020). E por fim, os estimulantes, que são substâncias, de origem natural (obtidos pela extração vegetal, a exemplo a cafeína), e sintéticos (obtidos no laboratório, como o metilfenidato), eles capazes de causar alteração no Sistema Nervoso Central, estimulando o sistema cardíaco e metabólico, e podem elevar o estado de vigília e estímulo, causando mais alegria, bem-estar, dentre outros (SANTANA et al., 2020).

A relevância desses compostos tornou-se ainda mais agravante com a maior quantificação em amostras ambientais e sua consequente capacidade de alterações negativas dos padrões ecológicos, os efeitos à saúde humana e qualidade dos seres vivos, capacidade de toxicidade, alterações comportamentais, fisiológicas e até mesmo sexuais, em especial na biota aquática (CHEN et al., 2016; LIMA, 2017; PETRIE et al., 2018).

Os efluentes domésticos e industriais são as principais fontes de lançamento desses compostos emergentes, caracterizada principalmente pela ineficiência de remoção completa por ação de estações de tratamento de efluentes convencionais. Além disso, os efeitos das ações do cotidiano das pessoas também contribuem com o incremento de antibióticos, anti-inflamatórios, retardadores de chama, dentre outros no ambiente, seja através do uso e manuseio de fármacos e a sua excreção junto as fezes e urina, descarte inadequado dos mesmos e de suas

embalagens, uso de produtos de higiene pessoal e de limpeza, hormônios naturais e sintéticos, plastificantes e resinas, assim como em atividades agropastoris, dentre outros (LIMA; MONTAGNER, VIDALA e ACAYABAB, 2017).

Nesse contexto, faz-se necessário o investimento e desenvolvimento de sistemas de tratamento de efluentes capazes de remover os compostos emergentes e, ao mesmo tempo, sejam economicamente viáveis. Os Sistemas Alagados Construídos (SACs) caracterizam-se como alternativa para o tratamento destes compostos, pois possuem eficiência na remoção de compostos emergentes através da integração de mecanismos biológicos, físicos e químicos de remoção, além de oferecer baixo custo de implantação, manutenção e operação (MATOS; MATOS, 2017), quando comparados a outros sistemas. E se conjugados a outros sistemas de tratamento, como mais de um SAC, ou outras alternativas, a exemplo, unidade de ozonização, há uma eficiência ainda maior (LANCHEROS et al., 2019; GUEDES-ALONSO et al., 2020).

No Brasil, não há descrição na legislação brasileira sobre os limites para quantificação dos mesmos, nem na Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021, que dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, nem na Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011, que dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Quando comparados aos sistemas de tratamento convencionais, ainda é pouco utilizado SACs focados na remoção de compostos emergentes. Mas mesmo com as poucas informações, os estudos com testes realizados no Brasil e no mundo, mostram ser uma boa alternativa para esse tipo de tratamento.

2. OBJETIVOS

Este trabalho consiste em uma revisão de literatura, tendo como objetivo geral trazer uma compilação de dados de pesquisas científicas relevantes que avaliaram Sistemas Alagados Construídos sob diferentes concepções estruturais na remoção de compostos emergentes.

2.1. Objetivos específicos

Como objetivos específicos, o presente trabalho visa analisar a identificação e quantificação de diferentes compostos emergentes em pesquisas científicas disponibilizada na literatura nacional e internacional, com ênfase aos mais recorrentes nos estudos, fazendo uma

análise dos valores encontrados e eficiências de remoção média comparando as características construtivas. Além disso, foram caracterizados os tipos de Sistemas Alagados Construídos (horizontal, vertical, híbrido e sistemas acoplados); presença ou ausência e tipos de substratos; e presença ou ausência de plantas, e quais tipos de espécies vegetais cultivadas.

Assim, com essa avaliação, espera-se encontrar a melhor configuração de SACs, para incentivar maiores estudos e utilização desses sistemas na remoção de compostos emergentes.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

Recentemente, aumento da preocupação com os compostos emergentes, presente nos efluentes e nas águas superficiais, principalmente em países desenvolvidos, tem sido relatado devido aos danos que podem causar à saúde humana e animal, assim como no meio ambiente (ÁVILA et al., 2015; LIMA et al., 2017; WANG et al., 2019; USEPA, 2020).

Os efeitos se tornam mais graves no meio ambiente em função das estações de tratamento de água (ETA) e de tratamento de efluente (ETE) quanto concepção convencional, não são dimensionadas para remoção efetiva desse tipo de compostos. No Brasil, a maior parte do território não possui tratamento de esgoto, principalmente em cidades pequenas e no interior (ÁVILA et al., 2015; WANG et al., 2019). Junto a isso, ainda há o descarte inadequado de efluentes pela população e indústrias, deixando probabilidade da presença dos mesmos em corpos hídricos.

A amplitude e aprofundamento do conhecimento sobre os contaminantes emergentes requer de maiores estudos, principalmente quanto a definição de valores limites para alteração da qualidade ambiental, equilíbrio ecológico e os efeitos na saúde humana e animal. Ainda se tem poucos estudos sobre os riscos que os compostos emergentes oferecem, em razão das concentrações muito pequenas, faltando testes eficientes para avaliá-las (DIAS, 2014; ÁVILA et al., 2015). Ocorre também devido as concentrações serem muito variadas, dependendo do fator de diluição e extensão do curso d'água que os recebe, da localidade, tamanho e consumo da população, sazonalidade, assim como os tipos de compostos presentes (OMS, 2011; DIAS, 2014; ARCHER et al., LIMA et al., 2017).

Além disso, na legislação brasileira vigente não há valores estipulados para os limites de concentração dos compostos emergentes nos efluentes tratados, não sendo possível comparar e avaliar quando as doses serão altas, moderadas ou baixas, carecendo de valores de referência

e sendo necessário mais estudos, pois ainda são poucos, assim, a maioria das empresas de tratamento não são obrigadas a monitorá-los e nem os remover.

3.1. Compostos emergentes

Compostos emergentes, denominados também de microcontaminantes, por possuírem concentrações da ordem de micro e/ou nanogramas (LIMA et al., 2017), constituem substâncias químicas, naturais ou sintéticas, que não costumam ser monitoradas, normalmente sem padrão regulatório e com alto potencial de alterar equilíbrio ecológico e provocar prejuízos à saúde. Os principais tipos são representados pelos fármacos, desreguladores endócrinos, hormônios, estimulantes, produtos de cuidados pessoais, nanomateriais e poluentes orgânicos persistentes (DIAS, 2014; USEPA, 2019).

Os fármacos são produtos terapêuticos e de consumo, de venda livre ou controlado, para uso humano ou veterinário, que estimulam resposta fisiológica e bioquímica, onde podem alterar as funções biológicas do corpo, ajudando em diversos tratamentos, principalmente para dores e doenças (USEPA, 2012; DIAS, 2014; LIMA et al., 2017). Além disso, suas características podem variar de acordo com sua função nos organismos, sendo uma grande parte hidrossolúveis, com baixa capacidade de evaporação e com estruturas criadas para não sofrerem modificações, mesmo quando em concentrações pequenas (ÁVILA, 2015; WANG et al., 2019). As classificações mais comuns são definidas os antibióticos, anti-inflamatórios, antipalúdicos, contraceptivos e reguladores lipídicos (DIAS, 2014; LIMA et al., 2017).

Os desreguladores endócrinos são substâncias que alteram as funções do sistema endócrino, eles são lipossolúveis, possuem baixa solubilidade e normalmente não podem ser metabolizados (DIAS, 2014; ZORRON, 2020). Os principais tipos são plastificantes, hormônios naturais e sintéticos, surfactantes, alguns agrotóxicos e metais traços, e os subprodutos originados dos mesmos (LIMA, 2017). Podem ser encontrados em materiais do dia a dia, como em plásticos, latas de metais, cosméticos, pesticidas, e até mesmo em alimentos (ZORRON, 2020).

Os hormônios focados neste estudo são os sexuais, especificamente os estrógenos, em função do crescente uso e maior presença nos efluentes. Caracterizam-se como biologicamente ativos, e utilizados para terapias de reposição, até mesmo câncer e, principalmente, como métodos contraceptivos (FILHO, ARAÚJO e VIEIRA, 2006). Os principais são estrona (E1), 17 β -estradiol (E2), estriol (E3), identificados como naturais, bem como o sintético 17 α -

etinilestradiol (EE2), e despertam grande preocupação, devido a grande quantidade introduzida no meio ambiente e o potencial deles em causar danos no ambiente.

Já os estimulantes, como o próprio nome diz, estimulam o Sistema Nervoso Central, acelerando o corpo, em diversas formas, podendo ser lícitas e ilícitas, e com um aumento cada vez mais crescente no Brasil (SANTANA et al., 2020). Neste estudo, os estimulantes presentes são a cafeína e nicotina, por meio do uso de café e cigarro, respectivamente, lícitas, e utilizadas por todas as faixas etárias.

Todos estes compostos podem ser lançados no ambiente de diversas formas, pelos dejetos humanos, esterco de animais, lixiviados de aterros, drenagens superficiais agrícolas, e lodos de ETEs (OMS, 2011; LIMA et al., USEPA, 2019). Devido as características dos mesmos, eles têm grande propensão de bioacumulação, e possuem de pequena a moderada biodegradabilidade (LIMA, 2017; ZORRON, 2020), o que aumenta a preocupação com esses tipos de substâncias.

3.2. Risco e impactos na saúde e no meio ambiente

O risco que eles causam, está ligado ao perigo específico do composto, e à sua exposição, pois o mesmo pode ter um grande perigo, porém se houver pouca ou nenhuma exposição e/ou concentração, o risco de contaminação será pequeno, e a exposição ocorre principalmente pela água (o principal foco neste trabalho), solo e ar contaminados, da ingestão de alimentos, e de forma dérmica, direta ou indiretamente (EUROPEAN COMMUNITIES, 2003).

Embora exista uma grande quantidade de contaminantes emergentes do tipo fármacos e estimulantes nos corpos hídricos, ainda há pouca relação de seus efeitos na saúde humana e veterinária (ARCHER et al., 2017; USEPA, 2019). Os mesmos, para a saúde humana, nas concentrações e exposições encontradas (usualmente encontradas nos corpos d'água), são muito improváveis de causar impactos adversos (OMS, 2012), porém podem ser tóxicos em altas concentrações e causar seleção de bactérias patogênicas resistentes (LIMA, 2017).

Já os desreguladores endócrinos e hormônios podem causar uma série de problemas associadas a alteração da saúde humana, do qual causam principalmente efeitos hormonais, bloqueando ou imitando hormônios naturais, danos na produção de espermatozoides, feminilização de machos, declínio na capacidade de reprodução, alterando metabolismo, e causando problemas

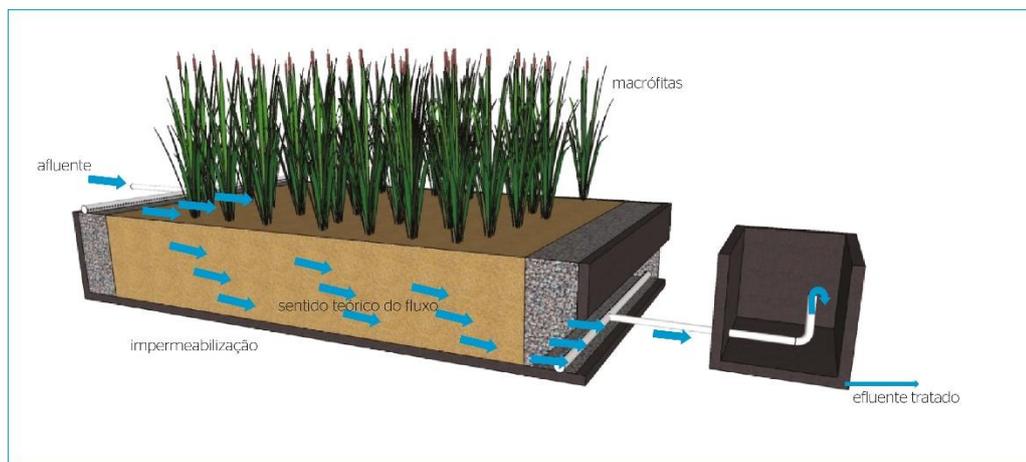
nas funções imunológicas e neurológicas, afetando especialmente a biota aquática (DIAS, 2014; LIMA, 2017; ZORRON, 2020).

Além disso, os efeitos dos desreguladores tem resultado em complicações na reprodução de peixes, mamíferos, répteis e pássaros, queda da eclosão de ovos de tartarugas, peixes e pássaros, e algumas vezes até causando declínio da população, e por outro lado, em humanos, os efeitos observados estão associados à redução de esperma, incidência de câncer de mama, de testículo e de próstata e, a endometriose (BILA e DEZOTTI, 2007).

3.3. Sistemas Alagados Construídos - SACs

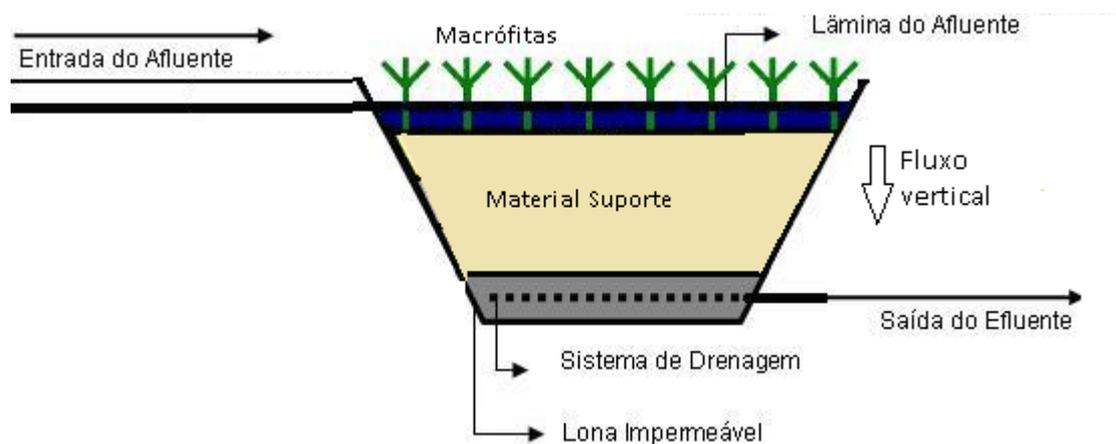
Os SACs são sistemas projetados, inspirados em alagados naturais, com boa capacidade para tratamento dos mais diversos tipos de efluentes, e utilizados em diversos países (VILAS BÔAS, 2013). Dentre as diferentes configurações utilizadas nos SACs, os mais comuns são os de escoamento vertical (SAC-EV) e horizontal (SAC-EH), mostrados nas figuras 1 e 2.

Figura 1 – Ilustração de um Sistema Alagado Construído de Escoamento Horizontal.



Fonte: SEZERINO et al. (2015).

Figura 2 – Ilustração de um Sistema Alagado Construído de Escoamento Vertical.



Fonte: JASPER et al. (2018).

Nos SACs-EV o efluente é desaguado na superfície verticalmente e a água residuária é distribuída para o material suporte e tratada à medida que percola, sendo coletada pelo sistema de drenagem na parte inferior do sistema. Por outro lado, em SACs-EH, o efluente passa pela entrada, escoar para a saída, é conduzido horizontalmente pela inclinação do sistema, tendo contato com todas as regiões, aeróbias, anaeróbicas e anóxicas, podendo ser subdividido em escoamento superficial ou subsuperficial (VILAS BÔAS, 2013). Além disso, a operação dos mesmos podem ser em bateladas ou contínuas, e podendo ter escoamento ascendente e descendente (MELO, 2020).

Nesses sistemas, as remoções de poluentes podem ocorrer por processos físicos, como adsorção no biofilme e nas raízes das plantas, retenção pelo substrato, volatilização, processos biológicos, sendo biodegradação o principal, absorção pela planta, oxidação pelo oxigênio e exsudados produzidos pela rizosfera, e até mesmo rizo remediação, e por processos químicos, nas conjugações e desconjugações de compostos (CHRISTOFILOPOULOSA et al., 2019; VYSTAVNA et al. 2017; LIN e LI, 2016).

Diferentes espécies de plantas podem ser introduzidas nos SACs, como macrófitas aquáticas flutuantes, submersas e enraizadas com uma parte aérea emergida, além de gramíneas e outras plantas, variando do local geográfico em que o sistema será instalado. Elas exercem papel fundamental na remoção de nutrientes/poluentes presentes nos efluentes, por meio do aumento de microrganismos presentes no substrato, presença de rizosfera, melhorando a eficiência de tratamento, e ainda podem proporcionar valorização estética, evitando a exposição

do efluente, tornando-o mais agradável visualmente (MATOS, 2017, CHRISTOFILOPOULOSA et al., 2019; NIVALA et al., 2019; MELO, 2020).

Nos SACs pode haver, ou não, a presença de material suporte, quando presentes contribuem com a sustentação e crescimento das plantas, suporte para produção do biofilme, contribuindo com o aumento das eficiências de remoção (MELO, 2020). Como exemplo de alguns materiais já utilizados como substrato em SACs, tem-se: cascalhos de diversos diâmetros, areia, carvão ativado, carvão de bambu, dentre outros.

3.4. Sistemas Modificados

Recentemente observa-se trabalhos utilizando SACs de maneira modificada também denominados sistema híbrido, que são constituídos por SACs, geralmente de escoamento vertical e horizontal, um seguido do outro, ou em maiores quantidades, combinando diferentes tipos de fluxos para criar processos multiestágios, visando aumentar a eficiência de remoção, pois combinam as vantagens de ambos os tipos (GAJEWSKA et al., 2018), como as melhores condições de oxigenação do fluxo vertical, e de condições anóxicas do fluxo horizontal (TEJEDA et al., 2017).

Como exemplo têm-se o estudo de Vystavna et al. (2017), onde continha dois SACs verticais, seguido de 2 SACs horizontais, tratando efluentes domésticos, e fazendo análise de remoção de 12 produtos farmacêuticos de diferentes propriedades, tendo eficiências de remoção superiores a 50%. Já Tejeda et al. (2017), que também realizaram análises tratando efluentes domésticos, em que compara a eficiência de remoção da Carbamazepina, e faz análise com diferentes configurações, sendo SAC horizontal seguido de SAC vertical, com eficiência média alcançada de 59%, e em ambas configurações, aumentaram a eficiência de remoção com sistema híbrido, quando comparados, com sistema de estágio único.

SAEED e SUN (2013) em estudos com SAC vertical seguido de um SAC horizontal tratando águas residuais têxteis brutas, observaram eficiência de remoção dos sólidos suspensos no sistema híbrido de 62,5%, enquanto dos sistemas de estágios únicos, do SAC horizontal, ficou na faixa de 25%, e do SAC vertical, com média de 50%.

Também caracterizados como híbridos, os sistemas conjugados são caracterizados por SACs utilizados antes ou depois de outro(s) sistema(s) de tratamento de efluentes, para aumentar a eficiência de remoções, aproveitando os benefícios de cada sistema, suprimindo possíveis desvantagens de cada um. Pode-se citar o estudo de Lancheros et al. (2019) que

continha um sistema acoplado composto de um SAC horizontal inicial seguido por uma unidade de ozonização empregando diferentes doses de ozônio, tratando efluentes de uma universidade, onde o SAC diminui a quantidade de compostos presentes, e a ozonização aumenta ainda mais as eficiências de remoção final do sistema.

Outro exemplo de sistemas conjugados, utilizando SAC, é do estudo de CASIERRA-MARTINEZ et al. (2020), que tratou águas residuais domésticas clarificadas da ETE de uma Universidade, que foram enriquecidas com Carbamazepina e Diclofenaco, utilizando sistema acoplados, com SAC de fluxo horizontal, seguido de fotorreator solar, em que a remoção dos compostos para o SAC sozinho variou de 46 a 56%, o fotorreator sozinho eficiência de 78 a 79%, e quando acoplados, as eficiências foram superiores a 85%.

3.5. Aplicação de Sistemas Alagados Construídos na remoção de compostos emergentes

Vários sistemas podem ser usados para remover compostos emergentes, muitos podem ter um alto custo, tornando a implementação difícil ou mesmo impraticável, sendo necessário assim, o desenvolvimento de formas alternativas de tratamento economicamente viáveis e ambientalmente corretas. (ÁVILA et al., 2015; LIMA, 2017; MELO, 2020).

Na literatura, são encontrados trabalhos recomendando o uso de SACs, pois são uma forma de tratamento natural, com baixos custos de manutenção, simples operação e com baixo impacto ambiental, além de apresentarem remoção eficiente tanto para os compostos emergentes, como para os parâmetros convencionais de efluentes, principalmente se associados a outros sistemas de remoção, como reator UASB, ozonização, lagoas de estabilização, dentre outros. (PAPAEVANGELOU et al., 2016; LANCHEROS et al., 2019; GUEDES-ALONSO et al., 2020; MELO, 2020).

Os mecanismos de remoção em SACs são complexos, porém, os principais fatores que podem influenciar no desempenho estão relacionados à configuração dos sistemas, às condições redox do meio, à comunidade microbiana, ao tempo de detenção hidráulica, a utilização das plantas e espécies das mesmas, ao substrato escolhido, à temperatura, a quantidade de compostos presente nos efluentes, o tamanho da área, dentre outros (DAI et al., 2016; NIVALA et al., 2019; RUPPELT, PINNEKAMP e TONDERA, 2020).

Pesquisas relatam, ainda, que os mecanismos de remoção de compostos emergentes, em escoamentos horizontais e verticais, envolvem biodegradação sobre as condições aeróbias e anaeróbias, pela adsorção no biofilme formado no substrato, além de fotodegradação pela

exposição à luz solar, absorção pelas plantas, retenção no biofilme, raízes e no substrato, volatilização e retenção, até mesmo em conjugações e desconjugações de compostos (ÁVILA et al., 2015; PAPADEVANGELOU et al., 2016; VYSTAVNA et al. 2017; LIN e LI, 2016; CHRISTOFILOPOULOSA et al., 2019).

4. METODOLOGIA

A presente revisão de literatura foi realizada na base de dados do portal de Periódicos da CAPES/MEC, por meio do endereço <http://www.periodicos.capes.gov.br>, com o acesso CAFE (Comunidade Acadêmica Federada), pela Universidade Federal de Lavras (UFLA), em busca avançada, com as seguintes palavras chaves, “wetlands” e “emerging compounds”, no período de janeiro de 2016 a dezembro de 2020, em qualquer idioma, com tipo de recurso sendo artigos, selecionando então artigos do mundo todo.

Foram encontrados 2394 artigos, mas para refinar foram filtrados somente artigos que continham efluentes originadas de efluentes domésticos, selecionando 19 artigos de diferentes países, e com maior abrangência de compostos possível.

Dos compostos emergentes presentes nos artigos analisados, foram selecionados apenas os compostos que foram observados em pelo menos 2 trabalhos, para analisar e comparar de forma mais precisa. Para melhor análise e visualização, os compostos emergentes foram separados em grupos, sendo:

- *Produtos farmacêuticos (remédios):* Amitriptilina (AMP), Atenolol (ATN), Carbamazepina (CBZ), Cetoprofeno (CLT), Claritromicina (CLT), Diclofenado (DCF), Eritromicina (ERT), Furosemida (FUR), Hidroclorotiazida (HID), Ibuprofeno (IBU), Metoprolol (MET), Naproxeno (NPX), O-Desmetiltramadol (O-DM), Paracetamol (PAR); Propranolol (PPN), Sulfametoxazol (SMX); Tramadol (TRA); Triclosan (TCS), e Trimetropina (TMT);
- *Hormônios:* 17 α -etinilestradiol (EE2), Estrona (E1) e E3 = Estriol (E3);
- *Estimulantes:* Cafeína (CAF) e Nicotina (NIC);
- *Compostos industriais:* Bisfenol-A (BPA) e Metilparabeno (MPB).

A partir dessa separação de artigos e compostos selecionados, foram levantadas as seguintes informações:

- Os poluentes emergentes analisados, bem como a eficiência do tratamento, evidenciando a remoção média dos mesmos;

- Configuração/tipos de SACs: Escoamento vertical e horizontal, híbrido e acoplados;
- Tipos de material suporte utilizado nos SACs;
- Presença de plantas e quais espécies foram utilizadas nos sistemas;
- A área superficial do sistema utilizado;

E assim, indicar o sistema que apresente as melhores eficiências de remoção, bem como suas características.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os artigos selecionados após os filtros de pesquisa, estão apresentados na Tabela 1, juntamente com os autores, ano e país de publicação, assim como o tipo de escoamento, material suporte e plantas utilizados, tempo de detenção hidráulico (TDH), e por meio de qual análise e equipamentos foram quantificados e analisados os compostos emergentes.

Dos 19 artigos selecionados, 8 deles não informaram qual(is) substrato(s) foram utilizados, e dos que informaram, 2 não descreveram o diâmetro, 5 não apresentaram a área superficial do SAC, 4 não descreveram qual foi o TDH utilizado para os experimentos, 3 não especificaram qual o tipo de escoamento, e dos que utilizaram plantas, somente 1 não especificou a espécie utilizada.

Considerando os 19 artigos levantados, foram estudados um total de 46 SACs, quanto ao escoamento, 58,5% são horizontais, 22% são verticais, 17,5% não descreve qual o tipo, e 2% sistema híbrido, sendo dois SACs verticais seguidos de dois SACs horizontais. Sobre a utilização de plantas, 91% possuem plantas nos SACs, sendo que 6,5% não descreve qual o tipo de espécie utilizado, mas mencionam que foi utilizada, e 9% não utiliza planta no sistema.

Quanto aos substratos, 41% usaram cascalho, 24% outros substratos, como areia, carvão e brita, e 35% não mencionou o substrato que usou. Em relação as áreas superficiais, 41% foram construídos com área igual ou menor a 28m², 35% são com áreas relativamente grandes, sendo acima de 300m², e 24% não informaram qual área do SAC.

E referente ao TDH, somente 4 estudos (7 sistemas) não informaram qual foi utilizado, sendo que os TDHs dos estudos que foram analisados variaram de 0,6 a 13 dias, sendo que 22 dos 29 sistemas que informaram o TDH, o tempo de detenção hidráulica foi menor que 7 dias.

Nos artigos analisados, foram encontradas remoções de 99 compostos, mas foram selecionados apenas os mais recorrentes, sendo 19 compostos de produtos farmacêuticos

(remédios), a exemplo dos Amitriptilina (AMP), Atenolol (ATN), Carbamazepina (CBZ), Cetoprofeno (CLT), Claritromicina (CLT), Diclofenado (DCF), Eritromicina (ERT), Furosemida (FUR), Hidroclorotiazida (HID), Ibuprofeno (IBU), Metropolol (MET), Naproxeno (NPX), O-Desmetiltramadol (O-DM), Paracetamol (PAR); Propanolol (PPN), Sulfametoxazol (SMX); Tramadol (TRA); Triclosan (TCS), e Trimetropina (TMT); 3 compostos de hormônios identificados como 17 α -etinilestradiol (EE2), Estrona (E1) e E3 = Estriol (E3, e estimulantes, sendo cafeína (CAF) e Nicotina (NIC), e desreguladores endócrinos, dos compostos industriais, presentes Bisfenol-A (BPA) e Metilparabeno (MPB), ambos, com apenas 2 compostos cada, sendo total de 26 compostos para análise. Na Tabelas 2 estão apresentadas as remoções médias de produtos farmacêuticos nos diferentes artigos. Já na Tabela 3 estão apresentadas as remoções médias de cada composto nos diferentes artigos, para hormônios, estimulantes e compostos industriais.

Tabela 1: Caracterização dos tipos, espécie de planta, substrato, área superficial e tempo de detenção hidráulica (TDH) de sistemas SACs descritos na literatura analisada. (Continua)

Autores	País	SAC ¹	Tipo ²	Planta	Substrato	Área Superficial ³ (m ²)	TDH (dias)	Análise ⁴
Ruppelt, Pinnekamp e Tondera (2020)	Alemanha	A	V	Sem planta	Areia (D = 0-2mm) e pedra calcária	4	NI	LC - MS/MS
		B	V Sub menor					
		A + C	V					
Melo (2020)	Brasil	A	H comum	<i>Pennisetumsetaceum</i>	Brita 0 (D = 7mm)	1	1,36	GC - MS/MS
		B	H Tipo pistão					
		C	H asc. e desc.					
Alonso, et al. (2020)	Espanha	A	V	<i>Phragmites, Cyperus, Pontederia, CannaeTypha</i>	NI	300	NI	UHPLC - MS/MS
Guedes-Alonso, et al. (2020)	Espanha	A	V	NI	NI	NI	NI	UHPLC - MS/MS
		B	H					
Wolecki, et al. (2020)	Polônia	A	NI	<i>Cyperuspapyrus, Phragmitesaustralis, SpathiphyllumAdans, Salixcinerea, JuncustenageiaEhrH, Acoruscalamus, Iris pseudacorus, Euonymuseuropaeus, Lysimachianemorum e BuddlejavidiiFranch</i>	NI	NI	NI	GC - MS/MS

Tabela 1: Caracterização dos tipos, espécie de planta, substrato, área superficial e tempo de detenção hidráulica (TDH) de sistemas SACs descritos na literatura analisada. (Continua)

Autores	País	SAC¹	Tipo²	Planta	Substrato	Área Superficial³ (m²)	TDH (dias)	Análise⁴
Nivala, et al. (2019)	Alemanha	A	H	<i>Phragmites australis</i>	Cascalho (D = 8-16mm)	5,6	01 a 04	UHPLC - MS/MS
		B	V	<i>Phragmites australis</i>	Cascalho (D = 4-8mm)	6,2		
		C	V + filtro de areia insaturada	<i>Phragmites australis</i>	Cascalho (D = 4-8mm) + Areia (D = 1-3mm)	6,2 + 2		
		D	V + aeração	<i>Phragmites australis</i>	Cascalho (D = 4-8mm)	6,2		
		E	H + aeração	<i>Phragmites australis</i>	Cascalho (D = 8-16mm)	5,6		
Campos, Queiroz e Roston (2019)	Brasil	A	H	<i>Cyperusisocladus</i>	Cascalho (D = 9,5-19,0mm)	0,24	2	HPLC - MS/MS
		B		Sem planta	Cascalho (D = 9,5-19,0mm)			
		C		<i>Eichhorniacrassipes</i>	Cascalho (D = 9,5-19,0mm)			
		D		<i>Cyperusisocladus</i>	Carvão de bambu e cascalho (D = 19-25mm)			
Oliveira, et al. (2019)	Brasil	A	V	<i>Heliconiarostrata</i>	Areia e cascalho médio (D = 4,8-9,5mm) e Cascalho Grosso (D = 25-32mm)	NI	7	HPLC - MS/MS
		B	V	<i>Heliconiarostrata</i>		NI		
		C	H	<i>Eichhorniacrassipes</i>	As macrófitas são flutuantes	0,45		
Lancheros, et al. (2019)	Colômbia	A	H	<i>Cyperusligularis</i>	Cascalho (D = 25,4mm)	0,425	2,5	GC - MS/MS
Christofilopoulou, et al. (2019)	Grécia	A	H	Sem planta	Cascalho ervilha (D = 0,8-1,25cm)	0,5	1	HPLC - MS/MS
		B		<i>J. acutus</i>	Cascalho ervilha (D = 0,8-1,25cm)	1		

Tabela 1: Caracterização dos tipos, espécie de planta, substrato, área superficial e tempo de detenção hidráulica (TDH) de sistemas SACs descritos na literatura analisada. (Continua)

Autores	País	SAC¹	Tipo²	Planta	Substrato	Área Superficial³ (m²)	TDH (dias)	Análise⁴
Nuel, et al. (2018)	França	A	V	<i>Juncus Effusus,</i> <i>Carex caryophylla, Salix</i> <i>alba, Iris pseudacorus,</i> <i>Callitriche palustris</i>	NI	520	3,5	UHPLC - MS/MS
He, et al. (2018)	Holanda	A	H	<i>Phragmites australis</i>	NI	20000	4	UHPLC - MS/MS e GC - MS/MS
		B	H	<i>Phragmites australis</i>		7009	0,82	
		C	V	<i>Phragmites australis</i>		7800	1,7	
Petrie, et al. (2018)	Reino Unido	A	H	<i>Phragmites australis</i>	Escória de Aço	550	0,6	UHPLC - MS/MS
		B			Cascalho silicioso			
		C			Cascalho silicioso			
Toro-Vélez, et al. (2017)	Colômbia	A	H	<i>Heliconias sp.</i>	NI	27	1,8	GC - MS/MS
		B		<i>Phragmites sp.</i>				
		C		Sem planta				
Tejeda, et al. (2017)	México	A	H	<i>Zantedeschia aethiopica,</i> <i>Iris</i> <i>sibiricae Typhalatifolia</i>	Rocha Tezontle moída (D = 0,645 – 2,3 mm)	0,48	3	HPLC - MS/MS
		B	V	<i>Strelitzia reginae</i>		0,23		

Tabela 1: Caracterização dos tipos, espécie de planta, substrato, área superficial e tempo de detenção hidráulica (TDH) de sistemas SACs descritos na literatura analisada. (Continua)

Autores	País	SAC¹	Tipo²	Planta	Substrato	Área Superficial³ (m²)	TDH (dias)	Análise⁴
Vymazal, et al. (2017)	República Tcheca	A	H	<i>Phragmites australis</i>	Rocha esmagada (D = 4-8mm)	706	6,3 a 11,6	Cary 60
		B		<i>Phragmites australis</i>	Cascalho (D = 4-8mm)	2100		
		C		<i>P. australis</i> + <i>P. arundinacea</i>	Cascalho (D = 4-8mm)	300		
		D		<i>P. australis</i> + <i>P. arundinacea</i>	Cascalho (D = 4-16mm)	1150		
Vystavna, et al. (2017)	Ucrania	A	V e H	<i>Phragmites australis</i> , <i>Typhalatifolia</i> , <i>Scirpus sylvaticus</i> , e <i>juncos</i>	Areia fluvial de origem local	2750	13	LC - MS/MS
Chen, et al. (2016)	República Tcheca	A	H	<i>Phragmites australis</i>	Cascalho (D = 4-8mm)	504	6,5	UHPLC - MS/MS
		B		<i>Phragmites australis</i>	Cascalho (D = 4-8mm)	983	5,4	
		C		<i>Phalaris arundinacea</i>	Cascalho (D = 4-16mm)	2645	12,9	
Lin e Li (2016)	Taiwan	A	NI	Sem planta	NI	NI	12	HPLC - MS/MS
		B		<i>E. crassipe</i>				
		C		<i>P. stratiotes</i>				

Fonte: Da autora, 2021.

NI = Não Informado; Na coluna F (substrato), D = diâmetro; ¹ SACs representados em letras, para diferenciar os tipos de sistemas utilizados no mesmo estudo. ²Tipos de Escoamento, sendo V= Vertical e H= Horizontal; ³Área Superficial dos SACs; ⁴Equipamentos utilizados para identificação e análise dos compostos, sendo LC - MS/MS = Cromatografia Líquida acoplada a Espectrometria de massa, UHPLC - MS/MS = Cromatografia Líquida de Ultra-Alto Desempenho acoplada a Espectrometria de massa, HPLC - MS/MS = Cromatografia Líquida de Alto Desempenho acoplada a Espectrometria de massa, e GC - MS/MS = Cromatografia Gasosa acoplada a Espectrometria de massa

Tabela 2: Remoção média, em porcentagem (%), dos compostos emergentes farmacêuticos dos 16 artigos analisados. (Continua)

Autor	SAC¹	CBZ	CTP	DCF	ERT	IBU	MET	NPX	O-DM	PAR	PPN	SMX	TRA	TCS	TMT
Nivala, et al. (2019)	A	13		25		28		32							
	B	-		53		95		90							
	C	-		77		99		98							
	D	-		70		99		99							
	E	-		74		98		94							
Lancheros, et al. (2019)	A					92,1		83							
Guedes-Alonso, et al. (2020)	A	-		-	-	35		18	51,4						10
	B	-		-	21	26,4		82	73						30
Wolecki, et al. (2020)	A					99,7		98,9		100					
Petrie, et al. (2018)	A	4		1		27	-	23	15	20	19	19	7	-	24
	B	2		0		26	4	23	14	69	17	28	4	19	45
	C	0		-		31	22	32	4	51	30	30	4	20	67
Nuel (2018)	A	-	47	-	-	37	15	11	-	-		-	13		-
Christofilopoulou, et al. (2019)	A											27,2			
	B											1,1			
He, et al. (2018)	A	1,5		32,8	-	-	-	40,6			36,3	5,6			
	B	-		8,4	6,3	-	5,2	4,4			-	12,7			
	C	-		53,1	94,3	7,8	84,9	57,7			82,8	76,3			
Lin e Li (2016)	A	6				0,3						5,7		35	
	B	36,2				93,7						42,5		80,9	
	C	34,3				99,8						88,7		97,5	

Tabela 2: Remoção média, em porcentagem (%), dos compostos emergentes farmacêuticos dos 16 artigos analisados.

Autor	SAC¹	CBZ	CTP	DCF	ERT	IBU	MET	NPX	O-DM	PAR	PPN	SMX	TRA	TCS
Vystavna, et al. (2017)	A	89		97		61		89		78	89			98
Chen, et al. (2016)	A		55	32,5		91	66	86,5		99			69	82
	B		79	95		94	90	82,5		100			85	73
	C		89	62,5		85	86	75,5		95			62	89
Vymazal, et al. (2017)	A		91,2	11,5		75	70,7			99,6			68,9	86,2
	B		46,9	67,1		51,6	65,9			89			53,5	52,9
	C		-	29,3		49,4	23,2			88,7			28,7	46,6
	D		18,1	58		45,6	31,1			86,2			60,5	73,2
Oliveira, et al. (2019)	A					94								
	B					90								
	C					89								
Melo (2020)	A			51,7		23,7		30,7		100				
	B			32		24,3		57,7		100				
	C			-		13,7		36		100				
Tejeda, et al. (2017)	A	49												
	B	38												
Ruppelt, Pinnekamp e Tondera (2020)	A	-		29			72					-		
	B	-		19			69					-		
	A+C	-		61			88					-		

Fonte: Da autora, 2021.

- = Não foram encontradas remoções; ¹SACs representados em letras, para diferenciar os tipos de sistemas utilizados no mesmo estudo. Os medicamentos são CBZ = Carbamazepina; CLT = Claritromicina; DCF = Diclofenado; ERT = Eritromicina; FUR = Furosemida; HID = Hidroclorotiazida; IBU = Ibuprofeno; MET = Metoprolol; NPX = Naproxeno; O-DM = O-Desmetiltramadol; PAR = Paracetamol; PPN = Propanolol; SMX = Sulfametoxazol; TRA = Tramadol; TCS = Triclosan; e TMT = Trimetopina.

Tabela 3: Remoção média (%) dos SACs observados para hormônios, estimulante e composto emergente industrial, de 16 artigos analisados. (Continua)

Remoção Compostos (%)		Hormônios			Estimulante	Industrial
Autor	SAC ¹	EE2	E1	E3	CAF	BPA
Ruppelt Pinnekamp e Tondera (2020)	A					34
	B					28
	A + C					65
Melo (2020)	A		39		100	-
	B		57		93,5	54
	C		100		100	-
Alonso et al. (2020)	A			100		
Guedes-Alonso et al. (2020)	A				60	
	B				90	
Wolecki et al. (2020)	A	92,5	63,5	95,2		
Nivala et al. (2019)	A				83	
	B				96	
	C				99	
	D				99	
	E				99	
Campos, Queiroz e Roston (2019)	A	61,4				57,7
	B	45,3				50,1
	C	54,7				40,3
	D	88,1				91,2
Oliveira et al. (2019)	A				96	
	B				97	
	C				94	
Christofilopoulou et al. (2019)	A					76,2
	B					26,8
Nuel et al. (2018)	A	21		83	35	
He et al. (2018)	A				-	-
	B				-	-
	C				-	-
Petrie et al. (2018)	A		36		43	7
	B		70		56	5
	C		70		74	3
Toro-Vélez et al. (2017)	A					73,3
	B					70,2
	C					62,2

Tabela 3: Remoção média, em porcentagem (%) dos SACs observados para hormônios, estimulante e composto emergente industrial, de 16 artigos analisados.

Autor	SAC¹	EE2	E1	E3	CAF	BPA
Vymazal et al. (2017)	A				97,5	
	B				83	
	C				65	
	D				89	
Vystavna et al. (2017)	A		74		88	
Chen et al. (2016)	A				99	
	B				99	
	C				96	

Fonte: Da autora, 2021.

- = Não foram encontradas remoções; ¹SACs representados em letras, para diferenciar os tipos de sistemas utilizados no mesmo estudo. Os compostos são: EE2 = 17 α -etinilestradiol; E1 = Estrona; E3 = Estriol; CAF = Cafeína; e BPA = Bisfenol-A.

Nos estudos de Ruppelt, Pinnekamp e Tondera (2020) foi utilizado efluente pré-tratado por sedimentação, onde os SACs são verticais e não possuem plantas, demais configurações são mostradas na tabela 1. Conforme mostrado na tabela 2, os compostos DCF, MET e BPA, tiveram remoções em todos os SACs, sendo o melhor índice no sistema C, com eficiências de 61%, 88% e 65%, respectivamente. Os autores acreditam que o principal mecanismo de remoção foi pela biodegradação que, aliado ao potencial redox, foi capaz de promover maior desempenho microbiano no sistema de tratamento. Para CBZ e SMX, não houve remoções, podendo ser devido à alta resistência de biodegradação e adsorção dos compostos, além de poder ter ocorrido recombinação de metabólitos para a substância original (RUPPELT, PINNEKAMP e TONDERA, 2020).

A melhor remoção de BPA observada por Campos, Queiroz e Roston (2019) tratando efluente sintético em 4 SACs de fluxo horizontal, onde o sistema B não possuía plantas, e os demais foram plantados com espécies diferentes, como apresentado na Tabela 1, assim como as demais configurações dos sistemas, sendo que a maior eficiência média de BPA foi 91,2%, no sistema D, que tinha carvão de bambu no meio suporte e nesse sistema também teve maior remoção de EE2, com 88,1%, conforme observados nas Tabelas 2 e 3. As maiores eficiências podem ter ocorrido por maior adesão no biofilme sobre a superfície do carvão do que só no cascalho, gerando maiores taxas de degradação; além disso, observou-se para EE2, que a menor remoção foi no sistema B, que não continha planta, e de BPA no sistema C, que tinha espécie *Eichhornia crassipes*, mostrando que a presença e a espécie da macrófita utilizada tem grande

influência na capacidade de estabilização de contaminantes emergentes, sendo neste estudo a melhor espécie a *Cyperusisocladus*. O estudo de Campos, Queiroz e Roston (2019) também fizeram análises com TDH de 4 dias, mas em todos os compostos e SACs, com 02 dias obteve melhor eficiência de remoção.

Nivala et al. (2019) estudaram efluentes que recebem tratamento primário em uma fossa séptica, onde, conforme apresentado na Tabela 1, os autores estudaram 5 SACs, variando o meio suporte, tipo de sistema e área superficial, sendo o sistema C desenvolvido com filtro de areia e os sistemas D e E com mecanismo de aeração. No estudo, os compostos IBU, NPX e DCF ficaram com ótimas remoções para os sistemas D e E, com melhores remoções de 99%, 99% e 77%, respectivamente, que podem ser observados nas Tabelas 2 e 3, enquanto que o sistema A foi o que obteve menores remoções, podendo ser devido à falta de oxigênio dissolvido no meio. A CAF teve remoções boas para todos os sistemas, e somente a CBZ que teve resultados negativos para todos os sistemas, exceto para o SAC A, com 13%, os autores justificam essa diferença devido ao composto ter biodegradabilidade limitada no tratamento biológico, e ser persistente em ambientes anaeróbicos, justificando a melhor remoção no sistema horizontal. Foi notada também a influência da temperatura e sazonalidade nos sistemas, principalmente o de escoamento horizontal, fatores que podem afetar a atividade microbiana ou a solubilidade de oxigênio (NIVALA et al., 2019).

Nos estudos de Lancheros et al. (2019), o efluente de uma universidade foi pré-tratado em um tanque de sedimentação, depois foi enriquecido com uma solução de IBP e NPX. Os autores analisaram somente um SAC de escoamento horizontal, com configurações descritas na tabela 1, e analisaram somente os compostos IBU e NPX, tendo ótimas remoções médias, de 92,1% e 83%, respectivamente, conforme mostrado na Tabela 2. Os principais mecanismos de remoção foram de forma natural, sendo por fitodegradação, degradação microbiana e sorção. Os autores ainda demonstraram que no sistema conjugado composto por SAC horizontal seguido por uma unidade de Ozonização, as eficiências de remoção aumentaram em torno de em 14,3% para NPX, e 5,1% para IBU, quando comparado a um único SAC horizontal, evidenciando a capacidade da oxidação dos compostos

Já Toro-Vélez et al. (2017) tiveram o afluente para os SACs proveniente do efluente de uma lagoa anaeróbia como tratamento primário das águas residuais domésticas da cidade do Valle del Cauca, na Colômbia. Os autores analisaram somente os compostos industriais BPA e MPB, onde foram realizados o estudo em 3 SACs de escoamento horizontal com as mesmas configurações, variando em relação as plantas, que podem ser observadas na Tabela 1, sendo

que o sistema sem planta (C) foi o que apresentou remoções mais baixas, sendo 62,2% para BPA e 25,3% para MPB, e com a planta *Heliconias sp.* (sistema A), apresentou as melhores remoções, sendo 73,3% para BPA e 62,8% para MPB, como pode ser analisado na Tabela 3, mostrando a grande importância da planta, principalmente para a remoção do MPB. Os principais mecanismos de remoção foram a sorção, no biofilme, nos sólidos suspensos, nos meios de suporte e na rizosfera, e a biorremediação (TORO-VÉLEZ et al., 2017).

Christofilopoulou, et al. (2019) utilizaram SAC como pós-tratamento de efluentes da ETE da cidade Chania, na Grécia, que seguiram para um tanque onde foram enriquecidas com os desreguladores endócrinos BPA e SMX, e por fim, foram encaminhadas para os SACs, onde as configurações estão descritas na tabela 1, sendo que o SAC A não continha planta e o B, continha. Neste estudo, foram constatados que o SMX apresentou remoções de 1,1% e 27,2% nos SACs A e B, respectivamente, enquanto o BPA apresentou 76,2% de eficiência de remoção no SAC B e 26,8% no SAC A, mostrando a importância das macrófitas nos sistemas. Christofilopoulou, et al. (2019) mencionaram também a influência da temperatura dos SACs, onde aumentam a atividade das raízes das plantas e ao maior biofilme no leito de brita na estação quente.

Lin e Li (2016) trataram efluente sintético, onde estudaram SACs plantados com espécies diferentes, e sem a utilização de plantas, com TDH igual para todos sistemas, de 14 dias, demonstrando rápida remoção em 4 dias, e gradualmente atingindo um platô em 12 dias, as demais configurações estão descritas na tabela 1. Os compostos analisados foram CBZ, IBU, SMX e TCS, e conforme pode ser visto na tabela 2, as piores remoções foram no sistema A, com 6%, 0,3%, 5,7% e 35%, respectivamente, e as melhores no sistema B, com remoções de 34,3%, 99,8%, 88,7% e 97,5%, mostrando o quanto a planta é essencial para remoções eficientes nos SACs, sendo que a espécie *P. stratiotes* mostrou uma taxa de crescimento mais rápida e sistema radicular mais desenvolvido, por isso pode ter sido mais eficiente. Os principais mecanismos a biodegradação, a fotodegradação e a absorção pela planta. Os autores mostraram também que altas concentrações dos compostos causaram efeitos colaterais nas plantas, com folhas secas e raízes morrendo após aproximadamente 13 dias (LIN e LI, 2016).

Petrie et al. (2018) trataram amostras coletadas no sudoeste do Reino Unido, com sedimentação primária, tratamento secundário por filtros de gotejamento e sedimentação, seguida de SACs como etapa final. Os autores avaliaram 3 SACs de escoamento horizontal em escala real, com diferentes substratos, sendo o primeiro sistema (SAC A) preenchido com escória de aço, os outros 2 com cascalho silicioso, demais características estão descritas na

tabela 1. Podemos analisar nas Tabelas 2 e 3 que dos 18 compostos analisados no estudo, 10 tiveram melhores remoções no SAC C, dos quais IBU, MET, NPX, PPN, SMX, TCS, TMT, E1, CAF e MPB, no SAC A, 6 compostos apresentaram satisfatória remoção, sendo CBZ, CLT, DCF, *O*-DM, TRA e BPA, e apenas 2 compostos resultaram nas melhores remoções no SAC B, sendo NIC e PAR. No geral, este estudo mostra que o melhor sistema foi o que já estava a mais tempo em operação, e que o melhor substrato é cascalho silicioso, comparado com o de escória de aço (PETRIE et al., 2018).

Chen et al. (2016) estudaram sistemas em grande escala que trataram efluentes municipal de pequenas aldeias, em que os SACs estavam acompanhados com unidade de pré-tratamento como peneiras, câmara de areia e tanque Imhoff. Os autores avaliaram 3 SACs horizontais, preenchidos com cascalho, variando a área superficial, os TDHs, e as espécies plantadas, conforme mostrado na Tabela 1. Foi estudada a remoção de 12 compostos, as melhores remoções foram no SAC onde a espécie plantada foi *P. australis* e possuía área grande, sendo as melhores remoções dos compostos TRA, CAF, PAR, DCF, IBU, MET, NPX, com eficiências superiores a 82,5%. O SAC C, com a maior área dos 3 SACs, resultou em eficiências acima de 88% para remoção dos compostos ATN, CTP, FUR, HID e TCS, conforme mostrado nas tabelas 2 e 3. Neste estudo foi verificado pouca influência dos consumos sazonais dos medicamentos, como uso mais frequente de analgésicos, antilipidêmicos e anti-inflamatórios durante a estação fria, e antissépticos na estação na mais quente (CHEN et al., 2016).

Nos sistemas horizontais, as condições redox são relativamente baixas. Chen et al. (2016) acredita que o desenvolvimento da rizosfera e a aeração artificial podem ser formas eficientes de aumentar a remoção de compostos nestes SACs, e além desse potencial redox, fatores como a idade do sistema, status de manutenção, clima local, carga afluente e características dos efluentes, também podem impactar nas eficiências dos SACs.

Vymazal et al. (2017) estudaram SACs horizontais de grandes escalas em zonas rurais tratando efluente bruto, variando as áreas superficiais, material suporte e espécies plantadas dos SACs, com maiores detalhes na tabela 1. O SAC A é o mais antigo (de 1992), visto que o B (de 1993), C (de 1998) e o D (de 2004) são de anos posteriores, e em todos eles as amostras foram coletadas entre 2014 e 2015. Foram analisados a remoção de 11 compostos, conforme mostrado nas Tabelas 2 e 3. As melhores eficiências de remoção os melhores resultados foram obtidos no SAC A, acima de 70,7%, foram dos compostos CTP, IBU, MET, PAR, TRA, TSC e CAF, por outro lado, o SAC B apresentou as melhores remoções para DCF e FUR, o SAC C para

CLT, e o SAC D apenas para HID, as eficiências detalhadas estão descritas nas tabelas 2 e 3. Os principais mecanismos de remoção dos compostos foram biodegradação (anaeróbia e aeróbia), fotodegradação, sorção, absorção pela planta, e para furosemida, também foi relatado remoção por hidrólise, mesmo sendo limitada em SACs horizontais. Com relação a remoção negativa de CTP no SAC C, os autores justificam pela transformação dos metabólitos conjugados em compostos parentais.

Melo (2020) avaliou 3 SACs de escoamento horizontal subsuperficial, tratando efluente originado da ETE – UFLA, após passar por tratamento preliminar (grades, medidor Parshall e caixa de gordura), e por tratamento secundário em reatores anaeróbicos de manta de lodo (UASB). O SAC A era do tipo convencional (sem a presença de chicanas), o SAC B possuía chicanas laterais, favorecendo o escoamento pistonado e o SAC C possuía chicanas verticais, favorecendo o escoamento ora ascendente ora descendente, as demais características estão descritas na Tabela 1. No estudo, os compostos CAF e PAR tiveram ótimas eficiências de remoção em todos os 3 sistemas, acima de 93,5%, BPA teve remoção de 54% no SAC B sob condições operacionais de, mas apresentou remoções negativas nos SACs A e C, podendo ser justificadas pela entrada de pequenas partículas de resinas epóxi e policarbonato pelo afluente, e sofrerem hidrólise dentro dos sistemas, transformando em BPA. Já o NPX e IBU também tiveram melhores remoções no SAC B, já E1 apresentou melhor eficiência no SAC C, e DFC melhor remoção no SAC A, as eficiências estão descritas nas Tabelas 2 e 3. Em geral, os possíveis mecanismos de remoção relatados por Melo (2020) foram biodegradação no biofilme e plantas, sorção no substrato e absorção pelas plantas.

Guedes-Alonso et al. (2020) estudaram dois SACs, sendo um horizontal (SAC B) e outro, vertical (SAC A), tratando efluentes pré-tratados em grades e tanque Imhoff. O SAC A demonstrou melhor eficiência para a maioria dos compostos, onde os compostos ERT, NPX, O-DM, TMT, CAF e NIC, resultaram nas remoções de 21%, 82%, 73%, 30%, 90% e 93%, respectivamente, e o SAC B resultaram em remoções de -23%, 18%, 51,4%, 10%, 60% e 60%, respectivamente; e para IBU o SAC B apresentou remoção um pouco melhor, sendo 35%, contra 26,4% para o SAC A; os compostos CBZ e DCF apresentaram remoções negativas para ambos os sistemas, que podem ser explicados pelos processos de desconjugação, onde metabólitos conjugados podem ser convertidos de volta ao composto original por processos enzimáticos, e pelas oscilações durante o dia.

He et al. (2018) estudaram SACs em escala real como tratamento terciário, sendo dois por escoamento horizontal (SAC A, operando desde 1999 e SAC B, operando desde 2001) e

outro com escoamento vertical (SAC C, operando desde 1997), as demais características estão detalhadas na Tabela 1. As melhores remoções foram encontradas no SAC C para os compostos DCF, ERT, IBU, MET, NPX, PPN, SMX, as eficiências estão descritas na Tabela 2, podendo ser porque os sistemas verticais geralmente alcançam uma melhor oxigenação e possuem um efeito rizosfera superior na rizodegradação, bem como na adsorção. O composto CBZ só não teve taxa negativa para o sistema A, mas com apenas 1,5% de remoção, já os compostos BPA e CAF tiveram eficiências de remoção negativas nos 3 sistemas, sendo o único estudo desta revisão em que foram encontradas remoções negativas para a CAF. Os valores negativos podem ter se originado da campanha de amostragem única ou irregular ou serem causados por desconjugação; por fim, os principais mecanismos de remoção encontrados neste estudo são biodegradação, adsorção e possível fitorremediação.

Outro estudo com SACs de escoamento horizontal e vertical foi o de Oliveira et al. (2019), que trataram efluentes domésticos bombeados de uma fossa séptica, onde os SACs A e B são do tipo vertical, e o SAC C do tipo horizontal, as demais características estão detalhadas na tabela 1. Os compostos IBU e CAF resultaram em eficiências de remoção acima de 89% em todos os sistemas, sendo que os verticais foram levemente melhores, os autores justificam por eles sofrerem menos influência de sobrecargas e terem melhores fluxos de oxigenação insaturados. Quanto a presença de minhocas, não foi mostrado relevância nas eficiências, e os principais mecanismos de remoção relatados foram biodegradação, sorção, adsorção e degradação microbiana no biofilme, além da possível absorção pela planta.

Tejeda et al. (2017) estudaram parte do efluente gerado no campus de uma universidade de Ocotlán, no México, que passaram por tratamento preliminar em um tanque de sedimentação, e foram no estudo foi usado SAC horizontal com policultivo (SAC A), e SAC vertical com apenas uma espécie plantada (SAC B), que foram alimentados com, enriquecido com carbamazepina, as demais características estão detalhadas na tabela 1. No estudo teve diferentes formas de configurações, sendo a 1 – SAC A seguido por lagoas de estabilização (SPs), a 2 – SAC A seguido de SAC B, e a 3 – SAC B seguido de SAC A, sendo analisado somente a remoção da CBZ, que apresentou para a configuração 1, remoção de 48,3% no SAC A e aumentou 14,1% nas lagoas de estabilização, na configuração 2, a eficiência de remoção foi de 49% no SAC A, e aumentou 10% no SAC B, já na configuração 3, a eficiência de remoção foi de 38% nos SAC B, com apenas com remoção adicional de 6% no SAC A, sugerindo que a remoção do medicamento é favorecida por condições anóxicas no tratamento primário, e relatado mecanismos de remoção por biodegradação, facilitada pela presença de

uma população microbiana mais diversa promovida por policultura no SAC horizontal, e a absorção das plantas como mecanismo de remoção não teve tanta relevância.

Nuel et al. (2018) trataram efluentes de efluente bruto, com pré-tratamento com um dispositivo de peneiramento. Os autores estudaram um SAC de escoamento vertical em escala real, com policultura, as demais características são encontradas na tabela 1. Foram encontradas remoções negativas para de 9 compostos emergentes, dos 17 analisados, sendo: PAR, ERT, SMX, TMT, *O*-DM, CBZ, DCF, ATN, AMP, por outro lado, 8 compostos apresentaram resultados positivos: NPX, TRA, MET, EE2, CAF, IBU, CTP e E3, variando remoção de 11 a 83%, as eficiências são detalhadas nas Tabelas 2 e 3. Além disso, foram observadas fortes diferenças de remoções durante as estações do ano, explicitando que a temperatura tem influência nos mecanismos de remoção/degradação dos poluentes, sendo mais eficientes durante o verão, com maiores temperaturas, demonstrando, assim, que as eficiências variam também com frequência de detecção do composto, e acredita-se que quanto maior o tempo de operação, menor a eficiência do sistema.

Alonso et al. (2020) analisaram a remoção do composto EE3 em um SAC em escala real tratando efluente universitário pré-tratado por uma fossa séptica, do qual apresentava escoamento vertical e subdividia-se em 4 compartimentos, sendo o primeiro e terceiro de escoamento descendente, e o segundo e quarto de escoamento ascendente, com policultivo e área superficial de 300m². Maiores detalhes estão nas Tabelas 1 e 3, sendo que a eficiência de remoção de EE3 foi superior a 99%, sendo os principais mecanismos de remoção do hormônio são por sorção, e por biodegradação. Os autores demonstraram que houve influência da temperatura no sistema, com melhores remoções em temperaturas mais altas.

Wolecki et al. (2020) estudaram um sistema real de superfície livre, tratando efluente pré-tratado com tratamento mecânico de efluentes (grelhas e purgadores de areia aerados com desengordurantes), onde SAC continha policultivo, sendo as espécies escolhidas devido à melhor adaptação para crescimento. Foram analisados vários compostos, AMP, IBU, NPX, PAR, EE2, E1 e E3, todos com remoções, acima de 63,4%. Neste estudo foi avaliada 3 espécies, quanto ao mecanismo de remoção por absorção dos compostos pelas plantas, sendo *Cyperus papyrus*, *Euonymus europaeuse*, *Lysimachia nemorum*, concluindo que dentre elas, a *Lysimachia nemoruma* é a melhor espécie para esse fim.

Vystavna et al. (2017) estudaram um sistema real tratando efluentes de um hospital geriátrico na região de Kharkiv, na Ucrânia, com uma unidade de pré-tratamento com arejamento, sendo SACs do tipo híbrido, composto por 2 de escoamento vertical, seguidos de

2 de escoamento horizontal, as demais características estão descritas na tabela 1. Foram estudadas as eficiências de remoção dos compostos CBZ, DCF, IBU, NPX, PAR, PPN, TCS, E1, CAF, variando de 61 a 98%, sendo o único estudo desta revisão com remoção satisfatória (acima de 60%) de CBZ, demonstrando a eficiência em sistemas híbridos. A variedade de macrófitas também mostrou importância, pois fornecem substrato e troca gasosa para comunidades microbianas, por meio da biodegradação, além disso, outros mecanismos de remoção podem ter influenciado, como sorção, sedimentação, fotodegradação e absorção pelas plantas. No estudo também foi mostrado que a exposição solar, temperatura e disponibilidade de matéria orgânica podem influenciar na remoção dos compostos.

As remoções negativas encontradas nesta revisão, principalmente do composto CBZ, foram justificadas por He et al. (2018), Guedes-Alonso et al. (2020), Vymazal et al. (2017), Nivala et al. (2019) e Ruppelt, Pinnekamp e Tondera (2020), principalmente pela desconjugação, onde metabólitos conjugados podem ser convertidos de volta ao composto original por processos enzimáticos, e também pela alta resistência de biodegradação e adsorção de alguns compostos, campanha de amostragem única ou irregular e oscilações de quantidade dos compostos durante o dia. Além disso, Melo (2020) ao estudar a remoção composto BPA, observou que pode ocorrer a entrada de pequenas partículas de resinas epóxi e policarbonato pelo afluente e sofrerem hidrólise dentro dos sistemas, transformando em BPA, influenciando negativamente na sua remoção.

Nos estudos em que houve comparação entre SACs verticais e horizontais, não foi observado um consenso entre os estudos. Tejeda et al. (2017) e Guedes-Alonso et al. (2020) mostraram que as melhores eficiências foram nos sistemas horizontais, justificando que pode ser devido à área superficial, que contribui na sorção e na biorremediação, pois aumenta a exposição à absorção da planta, além de que compostos como a CBZ, a remoção é favorecida por condições anóxicas, no qual são complementadas por Chen et al. (2016) que acreditam que formas eficientes de aumentar a remoção de compostos nos sistemas horizontais seja pelo desenvolvimento da rizosfera e a aeração artificial. Já nos estudos de He et al. (2018), Nivala et al. (2019) e o de Oliveira et al. (2019), os verticais apresentaram melhores eficiências, justificando que pode ser por terem melhores fluxos de oxigenação e condições redox, conseqüentemente, maior oxigênio dissolvido, e por sofrerem menos influência de sobrecargas, além de disso, são vantajosos, por possuírem menor área superficial.

Quanto aos mecanismos de remoção, os estudos de Lin e Li (2016), Tejeda et al. (2017), Toro-Vélez et al. (2017), Vymazal et al. (2017), Vystavna et al. (2017), He et al. (2018), Petrie

et al. (2018), Christofilopoulou, et al. (2019), Lancheros et al. (2019), Oliveira et al. (2019), Alonso et al., (2020), Melo (2020), mostraram que os principais foram:

- Biodegradação: incluídos a rizodegradação e degradação microbiana, onde é facilitada pela presença de uma população microbiana mais diversa na rizosfera e no material suporte;
- Sorção: significativa principalmente para compostos hidrofóbicos, que preferem a fase sólida e são incorporados nos sedimentos, podendo ser ligados por coagulação-floculação a fases coloidais e particulares, e ocorrerem no biofilme, produzido pelo substrato e rizosfera;
- Absorção pelas plantas: onde compostos ionizáveis e altamente solúveis em água podem ser absorvidos pelas raízes da planta e realocados para o tecido na parte aérea, nas folhas, caule e raízes;
- Outros menos relevantes do que os demais mecanismos: adsorção pela raiz da planta, sedimentação, filtração, retenção, volatilização, fotodegradação, fitorremediação e hidrólise.

Na análise do presente estudo, foram comprovadas que a presença de plantas é importante para a remoção dos compostos emergentes, demonstrado pelos estudos de Lin e Li (2016), Toro-Vélez et al. (2017), Campos, Queiroz e Roston (2019) e Christofilopoulou et al. (2019), em SACs avaliados com e sem a presença de plantas, onde as eficiências de remoção foram maiores nos sistemas plantados. A influência das plantas está relacionada à liberação de oxigênio pelas raízes, aumentando a biodegradabilidade na rizosfera, devido ao aprimoramento das vias aeróbicas, além de excretarem exsudatos radiculares como fonte de nutrientes, estimulando o crescimento microbiano, aumentam a diversidade e abundância de comunidades bacterianas, e influenciando na degradação dos contaminantes orgânicos (TORO-VÉLEZ et al.; VYSTAVNA et al., 2017; PETRIE et al., 2018; CHRISTOFILOPOULOSA et al., 2019).

Ainda com relação as plantas, segundo Chen et al. (2016), Lin e Li (2016) e Wolecki et al. (2020), a eficiência aumenta dependendo das espécies escolhidas para plantas, onde dependem do volume do rizoma, do desenvolvimento do biofilme, da taxa de crescimento, do sistema radicular mais desenvolvido, e da adaptação para crescimento, o que afeta no transporte de poluentes para os tecidos vegetais. Um ponto de atenção em relação as espécies plantadas, mostrado por Lin e Li (2016) é que altas concentrações dos compostos causaram efeitos colaterais nas plantas, como senescência das folhas e raízes morrendo.

Quanto aos meios suportes escolhidos para os SACs, somente 2 estudos fizeram comparações entre diferentes substratos, o de Petrie et al. (2019), sendo que o SAC preenchido

com cascalho foi melhor do que o SAC preenchido com escória de aço, pois o cascalho fornece boa condutividade hidráulica e é mais resistente ao entupimento, além de facilitar a transferência de oxigênio para as camadas inferiores do SAC, e o estudo de Campos, Queiroz e Roston (2019), as melhores eficiências foram no sistema que foi preenchido com cascalho (granulometria de 19 a 25mm) e Carvão de bambu (*Dendrocalamusasper*,) foi melhor que o sistema preenchido somente com cascalho (granulometria de 9,5 a 19mm), demonstrando então, que o substrato pode influenciar, quanto a adesão no biofilme e com o fornecimento de oxigênio nas camadas mais profundas, gerando maiores taxas de degradação.

Outros fatores que foram mencionados nos estudos analisados que podem influenciar as eficiências de remoção dos SACs são disponibilidade de matéria orgânica, tempo de detenção hidráulica (mesmo não sendo relatados diferenças significativas nesta revisão), frequência de detecção do composto, a idade do sistema, status de manutenção, carga afluyente, características dos efluentes, e principalmente a temperatura, podendo ser relacionada com clima local, sazonalidade e exposição solar, que é melhor no verão e com temperatura mais alta, pois aumentam a atividade microbiana e/ou a solubilidade de gás (oxigênio), levando em consideração à maior cinética de biodegradação, favorecendo a degradação dos compostos emergentes (CHEN et al., 2016, VYMAZAL et al., VYSTAVNA et al., 2017; NUEL et al., 2018; CHRISTOFILOPOULOSA; LANCHEROS et al., NIVALA et al., 2019; ALONSO et al., 2020).

Ficou comprovado também neste estudo que os tratamentos realizados com dois ou mais sistemas acoplados possuem maiores eficiências, por meio do estudo de Vystavna et al. (2017) que avaliaram sistemas híbridos, e Tejeda et al (2017), que mostraram diferentes configurações para sistemas híbridos, em que todos aumentaram a eficiência de remoção. Lancho et al. (2019) demonstraram também que a ozonização acoplada ao SAC, podem contribuir com o aumento das eficiências de remoção. Nivala et al. (2019) relataram que sistemas com aeração possuem uma melhor remoção dos compostos emergente, e Ruppelt, Pinnekamp e Tondera (2020) observaram maiores eficiências de remoção em sistemas conjugados.

6. CONCLUSÕES

Portanto, conclui-se que, o uso de Sistemas Alagados Construídos mostrou potencial na remoção dos compostos emergentes, especificamente medicamentos farmacêuticos, hormônios, estimulantes e produtos industriais.

A melhor eficiência de remoção foi do composto cafeína, devido ao composto ser altamente solúvel em água, e a pior eficiência da Carbamazepina, pela alta resistência de biodegradação e adsorção.

Os mecanismos de remoção com maior atuação na estabilização de contaminantes emergentes por sistemas SACs foram físicos, químicos e biológicos, como a biodegradação, que é facilitada pela presença de uma população microbiana mais diversa, a sorção, sendo significativa principalmente para compostos hidrofóbicos, e ocorrerem no biofilme, e a absorção pela planta, principalmente para compostos ionizáveis e altamente solúveis em água.

A presença de plantas é capaz de liberar oxigênio no sistema SAC e otimizar a capacidade de atuação microbiana na biodegradação compostos emergentes no ambiente rizosfera, além da excreção de exsudatos, estimulando o crescimento microbiano, aumentando a diversidade e abundância de comunidades bacterianas, e influenciando na degradação dos compostos. Para a escolha das espécies a serem plantadas devem ser levadas em consideração a taxa de crescimento, sistema radicular mais desenvolvido e de crescimento.

Os substratos de maior área superficial contribuem mais eficientemente para a adesão do biofilme e maiores taxas de degradação, sendo o cascalho uma boa opção, pois fornece boa condutividade hidráulica, é mais resistente ao entupimento, além de facilitar a transferência de oxigênio para as camadas inferiores do sistema.

Os SACs de escoamento horizontal possuem área superficial maior, tendo a vantagem do aumento da exposição à planta, substrato e rizosfera, auxiliando na sorção e na biorremediação. Já os verticais possuem melhores fluxos de oxigenação e condições redox, conseqüentemente, maior oxigênio dissolvido, e sofrem menos influência de sobrecargas.

Para aumentar a eficiência de remoção de compostos emergentes, o ideal é utilizar sistemas modificados, contendo mais de um tipo de sistema, seja híbrido, onde contém SACs horizontal e vertical, aproveitando o benefício de ambos os fluxos, e mantendo o baixo de custo de implementação e operação, seja com sistemas conjugados, onde o SAC pode ser associado a outra tecnologia, como por exemplo, aeração artificial ou ozonização, mas em ambos, aumentariam os gastos de operação e manutenção. Esses sistemas modificados foram exemplificados em alguns artigos dos estudados nessa revisão, mostrando que foram formas eficientes de aumentar a remoção de compostos dos efluentes.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AALAM, T.; KHALIL, N. Performance of horizontal sub-surface flow constructed wetlands with different flow patterns using dual media for low-strength municipal wastewater: a case of pilot scale experiment in a tropical climate region. **Journal of Environmental Science and Health. Part A**, New York, v. 54, n. 12, p. 1245–1253, 2019.

ALONSO, R. et al. Pharmaceutical and personal care product residues in a macrophyte pond-constructed wetland treating wastewater from a university campus: Presence, removal and ecological risk assessment. **Science of The Total Environment**, Spain, v. 703, 2020.

ARCHER, E. et al. The fate of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs), endocrine disrupting contaminants (EDCs), metabolites and illicit drugs in a WWTW and environmental Waters. **Chemosphere**, Oxford, v.174, p. 437-446, mai. 2017.

ÁVILA, C. et al. Emerging organic contaminant removal in a full-scale hybrid constructed wetland system for wastewater treatment and reuse. **Ecological Engineering**, Lublin, v. 80, p. 108-116, jul. 2015.

BILA, D. M.; DEZOTTI Desreguladores endócrinos no meio ambiente: efeitos e consequências. **Quim. Nova**, São Paulo, v. 30, n. 3, 2007.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA. **Resolução n.º 430, de 13 de maio de 2011**. Brasília, DF, 2011.

BRASIL. Ministério da Saúde, Diário oficial da união. **Portaria GM/NS n.º 888, de 4 de maio de 2021**. Brasília, DF, 2021.

BRASIL, M. S.; MATOS, A. T. Avaliação de aspectos hidráulicos e hidrológicos de sistemas alagados construídos de fluxo subsuperficial. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v.13, n. 3, p.323-328, jul./set. 2008.

CAMPOS, J. M.; QUEIROZ, S. C. N.; ROSTON, D. M. Removal of the endocrine disruptors ethinyl estradiol, bisphenol A, and levonorgestrel by subsurface constructed wetlands. **Science of The Total Environment**, Brasil, v. 693, 2019.

CASSIERA-MARTINEZ, H. A. et al. Diclofenac and carbamazepine removal from domestic wastewater using a Constructed Wetland – Solar Photo-Fenton coupled system. **Ecological Engineering**, Colombia, v. 153, Jun. 2020.

CHEN, Y. et al. Occurrence, removal and environmental risk assessment of pharmaceuticals and personal care products in rural wastewater treatment wetlands. **Science of The Total Environment**, Czech Republic, v. 566–567, p. 1660-1669, 2016.

CHRISTOFILOPOULOSA, S. et al. Evaluation of a constructed wetland for wastewater treatment: Addressing emerging organic contaminants and antibiotic resistant bacteria. **New Biotechnology**, Greece, v. 52, p. 94-103, 2019.

CUI, L. et al. Removal of nutrients from septic tank effluent with baffle subsurface-flow constructed wetlands. **Journal of Environmental Management**, New York, v. 153, p. 33–39, Apr. 2015.

DAI, Y. et al. Application of a full-scale newly developed stacked constructed wetland and an assembled bio-filter for reducing phenolic endocrine disrupting chemicals from secondary effluent. **Ecological Engineering**, Amsterdam, v. 99, p. 496–503, Feb. 2017.

DIAS, R. V. A., **Avaliação da ocorrência de microcontaminantes emergentes em sistemas de abastecimento de água e da atividade estrogênica do estinilestradiol**. 2014. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

EUROPEAN COMMUNITIES. **Technical Guidance Document on Risk Assessment**. Italy, 2003. Disponível em: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC23785>. Acesso em 05 de fevereiro de 2022.

FILHO, ARAÚJO e VIEIRA. Hormônios sexuais estrógenos: contaminantes bioativos. **Química Nova**, São Paulo, 2006.

GAJEWSKA et al. Kinetics of pollutants removal in hybrid treatment wetlands – Case study comparison. **Ecological Engineering**, Poland, v. 120, p. 222-229, 2018.

GUEDES-ALONSO, R. et al. A Survey of the Presence of Pharmaceutical Residues in Wastewaters. Evaluation of Their Removal using Conventional and Natural Treatment Procedures. **Molecules**, Spain, 2020.

HE, Y. et al. Evaluation of attenuation of pharmaceuticals, toxic potency, and antibiotic resistance genes in constructed wetlands treating wastewater effluents. **Science of The Total Environment**, Netherlands, v. 631–632, p. 1572-1581, 2018.

JASPER, S. P. et al. Análise de econometria de dois sistemas naturais de tratamento de água residuária na suinocultura. **Irriga**, São Paulo, v. 13, n. 4, p. 540–551, 2008.

LANCHEROS, J. C. et al. Ibuprofen and Naproxen removal from domestic wastewater using a Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetland coupled to Ozonation. **Ecological Engineering**, Colombia, v. 135, p. 89-97, 2019.

LEHL, H. K. et al. Multiple aerobic and anaerobic baffled constructed wetlands for simultaneous nitrogen and organic compounds removal. **Desalination and Water Treatment**, Hopkinton, v. 57, n. 60, p. 29160–2916, Jun. 2016.

LIMA et al. Fármacos e desreguladores endócrinos em águas brasileiras: ocorrência e técnicas de remoção. **Eng Sanit Ambient**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 6, p. 1043-1054, nov/dez. 2017.

LIN, Y., LI, B. Removal of pharmaceuticals and personal care products by *Eichhornia crassipe* and *Pistia stratiotes*. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, Taiwan, v. 58, p. 318-323, 2016.

MATOS, A. T.; MATOS, M. P. **Disposição de águas residuárias no solo e em sistemas alagados construídos**. Viçosa: Ed. UFV, 2017. 371 p.

MELO, A. F. S. R. **Remoção De Contaminantes E Hidrodinâmica Em Sistemas Alagados Construídos Contendo Chicanas Dispostas De Diferentes Formas**. 2019. Dissertação (Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2020.

MONTAGNER, C. C.; VIDALA, C.; ACAYABAB, R. D. Contaminantes emergentes em matrizes aquáticas do Brasil: cenário atual e aspectos analíticos, ecotoxicológicos e regulatórios. **Quim. Nova**, São Paulo, v. 40, n. 9, p. 1094-1110, 2017.

NIVALA, J. et al. Dynamics of emerging organic contaminant removal in conventional and intensified subsurface flow treatment wetlands. **Science of The Total Environment**, Germany, v. 649, p. 1144-1156, 2019.

NUEL, M. et al. Seasonal and ageing effect on the behaviour of 86 drugs in a full-scale surface treatment wetland: Removal efficiencies and distribution in plants and sediments. **Science of The Total Environment**, France, v. 615, p. 1099-1109, 2018.

OLIVEIRA, M. et al. Ibuprofen and caffeine removal in vertical flow and free-floating macrophyte constructed wetlands with *Heliconia rostrata* and *Eichornia crassipes*. **Chemical Engineering Journal**, Brasil, v. 373, p. 458-467, 2019.

OMS. **Pharmaceuticals in drinking-water**. Geneva, May. 2012. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241502085>. Acesso em 12 ago. 2020.

PAPAEVANGELOU, V. A. et al. Removal of endocrine disrupting chemicals in HSF and VF pilot-scale constructed wetlands. **Chemical Engineering Journal**, Lausanne, v. 294, p. 146– 156, Jun. 2016.

PETRIE, B. et al. Biotic phase microollutant distribution in horizontal sub-surface flow constructed wetlands. **Science of The Total Environment**, United Kingdom, v. 630, p. 648-657, 2018.

RENGERS, E. E. et al. Hydraulic performance of a modified constructed wetland system through a CFD-based approach. **Journal of Hydro-environment Research**, London, v. 12, p. 91–104, Sept. 2016.

RUPPELT, J. P., PINNEKAMP, J., TONDERA, K. Elimination of micropollutants in four test-scale constructed wetland treating combined sewer overflow: Influence of filtration layer height and feeding regime. **Water Research**, Germany, v. 169, 2020.

SANTANA, L. C. et al. Consumo de estimulantes cerebrais por estudantes em instituições de ensino de Montes Claros/MG. **Rev. Bras. Educ. med.**, Brasil, 2020.

SEZERINO, P. H. et al. Experiências brasileiras com wetlands construídos aplicados ao tratamento de águas residuárias: parâmetros de projeto para sistemas horizontais. **Eng. Sanit. Ambient**, Brasil, jan/mar 2015.

SHIH, S. et al. Tracer experiment and hydraulic performance improvements in a treatment pond. **Water**, London, v. 9, n. 2, p. 137, Feb. 2017.

TEE, H. et al. Enhancement of azo dye Acid Orange 7 removal in newly developed horizontal subsurface- flow constructed wetland. **Journal of Environmental Management**, New York, v. 147, p. 349–355, Jan. 2014.

TEJEDA, A. et al. Carbamazepine removal in three pilot-scale hybrid wetlands planted with ornamental species. **Ecological Engineering**, Mexico, v. 98, p. 410-417, 2017.

TORO-VÉLEZ, A. et al. Longitudinal Removal of Bisphenol-A and Nonylphenols from Pretreated Domestic Wastewater by Tropical Horizontal Sub-Surface Constructed Wetlands. **Applied Sciences**, Colombia, 2017.

USEPA. **Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs)**. Washington, 2012. Disponível em: <https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NERL&dirEntryId=76663>. Acesso em: 10 ago. 2020.

USEPA. **White Paper - Aquatic Life Criteria for Contaminants of Emerging Concern**. Washington, 2019. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-08/documents/white_paper_aquatic_life_criteria_for_contaminants_of_emerging_concern_part_i_general_challenges_and_recommendations_1.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2020.

VILAS BÔAS, R. B. **Avaliação de sistemas alagados construídos combinados com diferentes configurações**. 2012. Dissertação (Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

VYMAZAL, J. et al. Occurrence and removal of pharmaceuticals in four full-scale constructed wetlands in the Czech Republic – the first year of monitoring. **Ecological Engineering**, Czech Republic, v. 98, p. 354-364, 2017.

VYSTAVNA, Y. et al. Removal efficiency of pharmaceuticals in a full scale constructed wetland in East Ukraine. **Ecological Engineering**, Ukraine, v. 108, A, p. 50-58, 2017.

WANG et al. Bioaccumulation behaviour of pharmaceuticals and personal care products in a constructed wetland. **Chemosphere**, Oxford, v. 222, p. 275-285, mai. 2019.

WOLECKI, D. et al. Evaluation of the Possibility of Using Hydroponic Cultivations for the Removal of Pharmaceuticals and Endocrine Disrupting Compounds in Municipal Sewage Treatment Plants. **Molecules**, Poland, 2020.

ZORRON, M. **Desreguladores Endócrinos: Você Sabe o que São e Onde Encontrá-los?** Portal Ped, Campinas, nov. 2017. Disponível em: <<https://www.portaled.com.br/especialidades-da-pediatria/alergia-e-imunologia/desreguladores-endocri- nos-voce-sabe-o-que-sao-e-onde-encontra-los/>>. Acesso em: 02 ago. 2020.