



Maria Júlia Marques da Cruz

**PROCESSOS DE REMOÇÃO/RECUPERAÇÃO DE
FÓSFORO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS: UMA REVISÃO**

LAVRAS – MG

2020

Maria Júlia Marques da Cruz

**PROCESSOS DE REMOÇÃO/RECUPERAÇÃO DE
FÓSFORO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS: UMA REVISÃO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal de Lavras, como parte das
exigências do Curso de Engenharia Ambiental e
Sanitária, para obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Mateus Pimentel de Matos

Orientador

LAVRAS – MG

2020

RESUMO

O fósforo (P) é um macronutriente em escassez no mundo já que o consumo tem sido muito superior à capacidade de fornecimento das rochas fosfáticas. Ao mesmo tempo, está presente em grandes concentrações em águas residuárias, que acabam contaminando cursos d'água e levando à eutrofização. Assim, o presente trabalho objetivou fazer um levantamento das tecnologias estudadas para remover e/ou recuperar fósforo presente em águas residuárias, visando gerar um panorama das técnicas citadas na literatura. Com base na revisão realizada, observou-se que as remoções de fósforo (P) podem ocorrer por princípios biológicos (absorção por algas e plantas, assimilação microbiana), físicos (sedimentação de lodo), físico-químico (sorção) e químicos (precipitação) em lagoas de maturação, sistemas alagados construídos, lodos ativados, mídias reativas e carvão ativado. A fertirrigação é uma técnica que reduz custos e propicia aproveitamento de água e nutrientes. As maiores remoções ocorrem por sorção e precipitação, sendo dependente de fatores de fabricação e composição dos materiais utilizados e condições do meio. O advento de pesquisas de recuperação de P de águas residuárias pode mitigar os impactos negativos da sua presença em ambientes aquáticos e fornecer o macronutriente para solos pobres.

Palavras-chave: recuperação de recursos; aproveitamento de resíduos, rotas de valorização

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. METODOLOGIA	1
3. TRATAMENTO CONVENCIONAL.....	2
4. LAGOAS DE MATURAÇÃO	3
5. SISTEMAS ALAGADOS CONSTRUÍDOS	4
6. FERTIRRIGAÇÃO	6
7. SORÇÃO EM MÍDIAS REATIVAS.....	7
8. CARVÃO ATIVADO E BIOCARVÃO	9
9. CONCLUSÃO.....	13
10. REFERÊNCIAS	13

1. INTRODUÇÃO

O fósforo (P) é um nutriente finito e essencial para vida na terra, não podendo ser substituído por nenhum outro elemento, razão pela qual tem sido fruto de um grande número de trabalhos. Obtido a partir de rochas fosfáticas localizadas em poucas regiões do mundo, o P pode estar presente na natureza nas formas de ortofosfatos, fosfatos orgânicos e polifosfatos (PANTANO et al., 2016).

Em solos altamente intemperizados, como encontrados no Cerrado e no Sudeste brasileiro, há baixa disponibilidade de P, sendo necessário realizar a administração de fertilizantes químicos fosfatados e de matérias-primas ricas em P (KLEIN; AGNE, 2013). Todavia, dada a grande demanda e limitação das reservas de rochas fosfáticas, tem havido uma grande preocupação em relação à disponibilidade nos próximos anos, sendo urgente a utilização de outras fontes (WEI et al., 2016).

Se por um lado, o P é nutriente essencial para produção agrícola, por outro lado, o seu excesso nas águas, seja oriundo de fontes pontuais (lançamento de esgotos sanitários e despejos industriais) ou difusas (lixiviação de áreas agrícolas e de criação de animais), resultam na eutrofização dos corpos de água doce. Esse fenômeno pode desencadear no aumento na presença de algas e plantas aquáticas, com conseqüente instabilidade da concentração de oxigênio dissolvido (OD) (de supersaturação à ausência); liberação de maus odores, prejuízo ao uso múltiplo das águas, encarecimento do tratamento de água, presença de microtoxinas, entre outros (HAGHSERESHT, 2009; DESMIDT, 2015; CHRISPIM, 2019; MAKITA, 2020).

Dada essa dualidade do P, deve-se propor opções que permitam aproveitar no solo, o macronutriente presente em fontes que hoje causam impactos ambientais negativos ao meio ambiente (SARTORIUS; VON HORN; TETTENBORN, 2012). Neste contexto, visualiza-se a remoção/recuperação do nutriente em resíduos e águas residuárias para a nutrição de solos como uma alternativa sustentável e desejável, técnicas nas quais são inseridos conceitos de economia circular (DANESHGAR et al., 2018).

Assim, o presente trabalho objetivou fazer um levantamento das tecnologias estudadas para remover e/ou recuperar fósforo presente em águas residuárias, visando gerar um panorama das técnicas citadas na literatura.

2. METODOLOGIA

O presente estudo revisou sistematicamente trabalhos científicos que avaliaram a eficiência de remoção de fósforo em águas residuárias utilizando diferentes mecanismos de remoção publicados entre 2005 a 2020.

Para refinar a busca, foram utilizadas as palavras-chave “tecnologias de tratamento”, “fosfato”, “eutrofização”, “esgoto” “economia circular”, estabelecidos de acordo com o tema a

ser discutido neste trabalho, podendo ser utilizados na língua inglesa e pareados nas bases de dados através do operador booleano “And”. Foram utilizadas as bases de dados: Periódicos Capes, Scopus, Web of Science, Science Direct e Google Scholar.

Como critério de elegibilidade, foram aceitos, os trabalhos que envolveram processos físicos, químicos, biológicos e a combinação destes, como tratamento convencional, lagoas de maturação, sistemas alagados construídos, fertirrigação, sorção em mídias reativas, carvão ativado e biocarvão na remoção de fósforo em águas residuárias. Em cada tópico, foi discutido sobre a potencialidade do emprego das técnicas, as dificuldades, eficiências reportadas na literatura, além da importância da remoção/recuperação de fósforo.

3. TRATAMENTO CONVENCIONAL

Empregado nas estações de tratamento de águas residuárias (ETARs) como etapa secundária visando a remoção de matéria orgânica, os lodos ativados também podem resultar em remoções elevadas de P, desde que haja configurações e condições de operação compatíveis propícias (VON SPERLING, 2002; LIU et al., 2019).

Para elevar a capacidade de remoção via processos biológicos, é preciso que haja assimilação de luxo pelos Organismos Acumuladores de Fosfato (OAP), que conseguem ter em suas células de 20-30% de P (o comum é cerca de 1% de P). De forma a selecionar os OAPs, é necessário que haja a alternância de condições anaeróbias e aeróbias, que podem ser alcançadas com a presença de diferentes estágios no mesmo reator, proporcionado pela recirculação do lodo e por diferentes taxas de aeração/mistura. Neste caso, o P é removido após a sedimentação do lodo nos decantadores secundários (HENRIQUE; SUSANA; CEBALLOS, 2020).

Como exemplos dessas configurações alternativas, pode-se citar o processo A¹O (três estágios – Anaeróbio/Anóxico/Aeróbio), Bardenpho (cinco estágios Anaeróbio/ Anóxico/ Aeróbio/ Anóxico/ Aeróbio), UCT (Anaeróbio/Anóxico/Aeróbio com duas etapas de recirculação) e reatores de alimentação em batelada, configurações denominadas unidades de remoção biológica aprimorada de fósforo (EBPR - *Enhanced biological phosphorous removal*) (GEBREMARIAM et al., 2011; YUAN; PRATT; BATSTONE, 2012).

Pesquisas atuais têm sido realizadas com intuito de otimizar o processo EBPR, visando investigar os fatores influentes na granulação do lodo, de forma a haver maior produção do lodo granular aeróbio (AGS). O AGS possibilitaria a remoção simultânea de carbono, nitrogênio e fósforo, devido à presença de microrganismos aeróbios, anóxicos e anaeróbios nos grânulos, coexistindo OAPs e OAG (organismos acumuladores de glicogênio). Resultados já obtidos indicam que a forma de alimentação (bateladas sequenciais), tempo de sedimentação, força de cisalhamento (condições de mistura) e carga orgânica aplicada interferem na granulação (PRONK et al., 2015; CIEŚLIK; KONIECZKA, 2017; CAMPO et al., 2020).

Outra via importante de remoção em lodos ativados é através da precipitação química, com formação de sais insolúveis que sedimentam e são removidos fisicamente (BASHAR et al., 2018; DESMIDT et al., 2015a). Para alcançar o objetivo, deve-se adicionar produtos químicos à base de Fe, Al, Ca e Mg, cátions que formam precipitados com fosfatos. (DESMIDT et al., 2015b). Além da quantidade e do tipo dos agentes precipitantes adicionados, as remoções de P dependem de parâmetros operacionais como pH, temperatura e a quantidade de cátions já presentes nas águas residuárias (LATIF; MEHTA; BATSTONE, 2015). Estudos realizados por Latif et al (2015) e Wu et al (2017), por exemplo, indicaram que a operação de um reator com um pH adequadamente baixo pode reduzir a precipitação e a remoção de P no lodo, havendo maiores concentrações efluentes do elemento químico.

Embora em lodos ativados, a remoção biológica de fósforo tem-se sido preferida à precipitação química, em função dos custos com produtos químicos (DESMIDT et al., 2015b; HENRIQUE; SUSANA; CEBALLOS, 2020), esse processo pode trazer alguns benefícios. O fósforo recuperado na forma de precipitados na forma de estruvita (fosfato de magnésio e amônio), hidroxiapatita (fosfato de cálcio) e vivianita (CHENG et al., 2017), nos lodos ativados, pode ser utilizado na agricultura, servindo como fonte de P, além de propiciar a elevação do pH (CIEŚLIK; KONIECZKA, 2017). Ressalta-se, no entanto, que deve-se realizar a avaliação das doses aplicadas no solo e a disponibilização do macronutriente para as culturas, de forma que o potencial hidrogeniônico passe a não ser o limitante ao fornecimento de P (TALBOYS et al., 2016).

4. LAGOAS DE MATURAÇÃO

Das diversas tecnologias de tratamento de esgoto em operação nas ETARs, as lagoas de estabilização estão entre as mais utilizadas no Brasil, em função da simplicidade de construção, operação e manutenção, além de elevadas eficiências de remoção, sobretudo em regiões de clima quente (MAYNARD; OUKI; WILLIAMS, 1999; DIAS et al., 2014; POSSMOSER-NASCIMENTO et al., 2014). Das diferentes configurações, pode-se destacar as lagoas de maturação, que em função de elevado pH e grande presença de algas pode apresentar eficiências de remoção de P que podem chegar até 80% (VON SPERLING, 1995).

Nas lagoas de maturação, a remoção de P pode ocorrer por assimilação algal, que pode absorver cerca de 1% da sua massa em fósforo; ou por precipitação na forma de hidroxiapatita, fosfato tricálcico e estruvita, através da complexação de íons metálicos, na presença de cálcio e magnésio em meio alcalino. Apesar da última rota corresponder a 90% da remoção de fosfato, as algas contribuem para criar condições propícias de elevado pH em função da sua atividade fotossintética e captação de CO₂ dissolvido em lagoas rasas (VON SPERLING, 1995; JEREMY, 2016; LAHIRI et al., 2018).

Além de alterar a profundidade, tornando a unidade mais rasa, o projetista pode elevar as eficiências das lagoas de maturação ao inserir um maior número de unidades em série e utilizar de chicanas. Segundo Jeremy (2016), Maynard, Ouki e William (1999) e Von Sperling (1995), lagoas mais rasas e com escoamento mais próximo ao fluxo em pistão tendem a apresentar maior remoção de P. Corroborando as afirmativas, Da Silva et al (2011) e Bouza-Deaño et al (2013) obtiveram maiores remoções com a utilização lagoas de maturação em série.

Tanto o lodo acumulado no fundo das lagoas quanto as algas geradas na lagoa de maturação podem ser aplicadas no solo como fonte de P. Casto et al. (2020), por exemplo, demonstraram que é possível substituir parte da adubação fosfatada com a utilização da biomassa algal.

5. SISTEMAS ALAGADOS CONSTRUÍDOS

Nos últimos anos, sistemas alagados construídos (SACs) passaram a ser projetados para o tratamento de diferentes águas residuárias resultado de pesquisas bem sucedidas em vários países, além de vantagens como harmonia paisagística, baixos custos e fácil operação e construção (GREENWAY, 2007).

Os SACs são classificados de acordo com o nível d'água em relação ao substrato e direção de escoamento, diferindo em três tipos básicos: escoamento superficial horizontal (SAC-ES), subsuperficial horizontal (SAC-EHSS) ou vertical (SAC-EV). Dada a presença de substrato e o maior tempo de contato das plantas cultivadas com os contaminantes a serem extraídos, os SACs-EHSS comumente são mais efetivos na remoção de P (KADLEC, R. H.; WALLACE, 2008). Segundo Ayaz et al. (2012), nessas unidades as eficiências de remoção são da ordem de 20-70% do fósforo, ocorrendo por mecanismos como absorção pelas plantas, adsorção no meio suporte de preenchimento, precipitação, assimilação microbiana e sedimentação, além de complexação no material orgânico presente nos espaços porosos do leito.

Assim, para que se possa alcançar as mais elevadas remoções, deve-se escolher plantas resistentes e com grande capacidade de extração de P; meio suportes com elevada área superficial e reativos (GREENWAY, 2007; CHAGAS et al., 2012). Diferentes espécies vegetais já foram avaliadas em SACs como macrófitas das espécies das famílias *Cyperaceae*, *Graminaceae* e *Typhaceae* (GREENWAY, 2007b) e taboa (*Typha*) (COSTA et al., 2015; MATOS et al., 2018; FIA et al., 2017); capins como azevém (*Lolium multiflorum*) (FIA et al., 2010; ROSSMANN et al., 2012), tifton-85 (*Cynodon spp.*) (FIA et al., 2017; GUIMARÃES et al., 2018) e elefante (*Pennisetum purpureum schum*) (MATOS et al., 2010); espécies ornamentais como o lírio-amarelo (*Heimerocallis flava*) (CHAGAS, , 2011; PRATA et al., 2013), entre outras. Sarmento et al. (2013) obtiveram maiores eficiências de remoção utilizando

Cyperus sp. em comparação com unidades cultivadas com *Heliconia rostrata*, *Hedychium coronarium* e não cultivadas.

Apesar da absorção representar menos de 10% remoção total de P no sistema (DU et al., 2017), alguns procedimentos como o corte frequente da parte aérea, a aplicação de carregamentos e a definição do tempo de detenção hidráulica (TDH) adequados podem propiciar maior capacidade de extração para as culturas (GREENWAY, 2007; VYMAZAL, 2007; MATOS et al., 2010). Sarmento et al. (2013), por exemplo, obtiveram maiores eficiências de remoção em TDH de 3,0 d. Já Verhofstad et al. (2017) indicaram que cortes a cada 40-60 dias é que proporcionam maior capacidade de extração de nutrientes. A biomassa vegetal retirada pode tanto ser utilizada para alimentação animal e artesanato, quanto ser aplicada no solo como adubação verde, podendo fornecer o P removido ao solo (BALLANTINE; TANNER, 2010; MATOS; MATOS, 2017; SILVA, 2018).

O meio suporte está relacionado à formação de biofilme que assimila P; à adsorção e precipitação de fosfatos, por reações com Ca, Al e Fe (VYMAZAL, 2007, MATEUS; VAZ; PINHO, 2012; VOHLA; BAVOR; CHAZARENC, 2011). Dentre os materiais utilizados avaliados como meios suportes nos sistemas alagados construídos, estão materiais naturais como a areia, cascalho, calcário, dolomita e zeólitos; resíduos indústrias como escória de alto forno, cinzas de carvão, cinzas de lama vermelha, e materiais sintéticos como filtralite, alunite e norlite (ROZARI; GREENWAY; HANANDEH, 2016). Vohla et al. (2011) realizaram um estudo comparativo dos principais meio filtrantes utilizados nos SACs e observaram que as maiores capacidades de remoção de P foram obtidas em subprodutos industriais (até 420 g P por kg para alguma escórias de forno), seguidas de materiais naturais (máximo 40g P por kg) e meios filtrantes sintéticos (máximo de 12g por kg para filtralite). De forma semelhante a sorção em mídias reativas (discutido a seguir), dependendo das características do material suporte pode ser interessante a sua aplicação no solo para haver lenta disponibilização do fósforo.

Na escolha dos materiais, no entanto, deve-se levar em conta também o tempo de vida útil dos leitos, já que materiais reativos sofrem maior desgaste e contribuem para a colmatção; tempo de saturação dos sítios ativos de sorção; aplicabilidade local; custo; capacidade de reciclagem como fertilizantes e toxicidade (VOHLA; BAVOR; CHAZARENC, 2011). Assim, na concepção de SACs, deve-se fazer uma análise financeira, de desempenho e de vida útil para escolha da configuração a ser adotada. Na Tabela 1 estão apresentados alguns dos sistemas alagados construídos citados no texto, com comparativo das configurações e as eficiências proporcionadas.

6. FERTIRRIGAÇÃO

Ao mesmo tempo que a médio/longo prazo é crítica a disponibilidade do elemento químico para produção de alimentos, águas residuárias e resíduos sólidos ricos em P lançados no meio ambiente têm causado eutrofização dos corpos d'água. Assim, o aproveitamento do macronutriente dessas reservas poderia mitigar dois problemas com uma só alternativa (KIHILA et al., 2014; EGGLE et al., 2016; KOK et al., 2018).

A fertirrigação é definida como a técnica de disponibilização de nutrientes via irrigação, podendo ser utilizadas águas residuárias de diferentes tipos, desde que respeitados os limites de aplicação conforme requerimento de macronutrientes e micronutrientes pela cultura (MATOS, 2014; MATOS; MATOS, 2017). Utilizando a fertirrigação, pode haver economia de água, sendo que a irrigação é responsável por 70% do consumo de água no mundo; de nutrientes; e redução de custos do tratamento da água residuária (MOYO et al., 2015; MARQUES, et al. 2017). Visto que quanto maior o grau de tratamento realizado nas estações de tratamento, menor é a disponibilidade de macro e micronutrientes, ou seja, quanto menor for o grau de tratamento, maior é o valor fertilizante da água residuária (MATOS et al., 2017; WESTERN CONSORTIUM, 1992).

Além disso, há melhoria dos atributos físicos (estruturação e retenção de água), químicos (disponibilidade de nutrientes) e biológicos do solo (maior diversidade microbiana e produtividade), sendo uma prática altamente recomendável em solos pobres e em regiões de baixo índice pluviométrico (BEDBABIS et al., 2010; YANG et al., 2011). Diferente de outras técnicas, na qual o P é removido da água residuária e o subproduto gerado é aplicado no solo, na fertirrigação a adição de P ocorre diretamente da fonte.

Estudos efetuados no Brasil têm demonstrado a potencialidade da técnica em cultivos de grandes culturas como a cana-de-açúcar (BLUM et al., 2011; FREITAS et al., 2013), algodoeiro (SOUSA NETO et al., 2012), feijoeiro (DE SOUZA et al., 2015; REBOUÇAS et al., 2010) e cafeeiro (MEDEIROS et al., 2008); em forrageiras (GARCIA et al., 2012), moranga (OLIVEIRA et al., 2013); hortaliças (alface hidropônica) (CUBA et al., 2015); espécies frutíferas como melancia (SALGADO et al., 2018; SOUZA et al., 2017), melões (COSTA et al., 2014), mamões (BATISTA et al., 2017) e tomateiros (QUEIROZ; QUEIROZ; ARAGÃO, 2015), resultando em muitos dos casos produtividade superior à adubação química, dada a grande diversidade de macro e micronutrientes presentes nas águas residuárias.

Como toda técnica, essa deve ser feita com critério, de forma a não resultar em impactos ambientais como salinização do solo, contaminação de águas subterrâneas e riscos sanitários (MATOS; MATOS, 2017). Dada a baixa mobilidade, o P não é um elemento químico detectado em grandes concentrações no lençol freático de solos fertirrigados (BLUM et al., 2013; MATOS, 2014), no entanto, deve-se monitorar outros íons.

Quanto ao risco de contaminação com organismos patogênicos, trabalhos como o de Oliveira (2018), Pereira et al. (2014) e Santos et al. (2006) demonstraram que as condições do solo não são propícias para sobrevivência desses microrganismos e que em torno de 15 dias são suficientes para redução do risco sanitário. Ainda assim, recomenda-se evitar a fertirrigação de culturas consumidas cruas com métodos de irrigação nos quais a parte comestível tenha contato com a água residuária (que contenha patógenos).

Para regular a aplicação e resguardar a qualidade ambiental, timidamente tem surgido resoluções para a técnica da fertirrigação. Em Minas Gerais, pode-se citar a Resolução COPAM 164/2011, referente à vinhaça, e COPAM 65/2020, que trata do uso de esgoto.

7. SORÇÃO EM MÍDIAS REATIVAS

O fenômeno da sorção consiste na impregnação de uma substância dissolvida em um fluido na parte sólida de um meio poroso durante a percolação. A ocorrência da sorção refere-se a ação da absorção e adsorção, sendo a absorção a incorporação de uma substância em um estado para outro de um estado diferente e a adsorção a adesão física ou ligação de íons e moléculas na superfície de uma outra molécula (PIGNATELO, 1999).

Dentre os vários mecanismos de recuperação e remoção de fósforo no tratamento de águas residuárias, a adsorção se destaca por ser uma prática versátil com base na sua simplicidade operacional e seu imenso potencial de reutilização de adsorventes (YADAV et al., 2015). Em função da grande interação entre o fósforo e alumínio e o ferro, podendo sofrer sorção ou precipitados, muitas das avaliações são feitas com óxidos e hidróxidos desses elementos químicos (ZHAO et al., 2015; LI et al., 2016; SHEMER; ARMUSH; SEMIAT, 2019). Os sorventes à base de ferro também possuem outras vantagens como de serem quimicamente estáveis em pH variados; são facilmente sintetizados e modificados, o que os torna muito versáteis e econômicos (SHEMER; ARMUSH; SEMIAT, 2019).

Como comumente são utilizados coagulantes de sais de Fe e Al, tem-se no lodo de estação de tratamento de água (ETA) um resíduo em potencial para sorção/precipitação de fosfatos. Estima-se que são gerados 100.000 toneladas por ano de lodo em todo o mundo, o que implica em grandes gastos com disposição em aterros sanitários, de um material que poderia ser melhor aproveitado (YANG et al., 2014; AHMAD; AHMAD; ALAM, 2016).

Dentre os trabalhos que utilizaram o lodo de ETA para recuperação de P, encontra-se os trabalhos de Yang et al. (2014), no qual foi obtida remoção de até 5,72 mg P por grama de sorvente. Com a utilização do resíduo, Wang et al. (2018) conseguiram reduzir a concentração de P na água residuária para valores inferiores a 0,01 mg L⁻¹.

Como fatores de influência no desempenho dos sorventes de lodo de ETA, pode-se citar o tempo de contato entre sorvente e sorbato; quantidade de material sorvente adicionado; a área superficial e o pH do meio, que interferem na densidade de cargas do material e na

predominância de cargas positivas e negativas. Li et al (2020), por exemplo, observaram que a utilização de lodo de ETA em pó proporcionava melhores resultados do que em grânulos, e que os melhores resultados foram obtidos em pH ácido (3,0-6,0). A explicação é que em meio ácido, há predomínio de cargas positivas no sorvente, favorecendo maior adsorção do ânion fosfato (YANG et al., 2006). Já Coelho (2018) observou que quanto maior a massa e o tempo de contato entre sachês contendo lodo de ETA e a solução de P, menor é a concentração de P na solução final.

Assim com os lodos de ETA, os lodos provenientes de drenagem ácida de minas também têm sido reportados na literatura como ótimos sorventes de P, dado o baixo pH e, dependendo do material de origem, elevados teores de Fe e Al. Sibrell et al (2009) obtiveram eficiências de 60 a 90% na remoção de P de águas residuárias agroindustriais com baixos tempos de contato (inferiores a 5min).

Como quanto maior a quantidade de sorvente adicionada, maiores são as eficiências de remoção, a escolha do material utilizado também deve ser pautada pelos custos associados, sendo de interesse a utilização de materiais e resíduos disponíveis na região, como é o caso do lodo de ETA (KRISHNAN; HARIDAS, 2008). Eljamal et al. (2013), por exemplo, avaliaram o uso de materiais naturais, como o pó de mármore, serragem, solo e a casca de arroz, e obtiveram remoções de P, respectivamente, de 93,00, 18,46, 12,72 e 5,03%

A casca de ovo é um resíduo agroindustrial rico em cálcio, que pode formar precipitados e ligações com fosfatos, sendo outro material de baixo custo e potencial para utilização para remoção/recuperação do macronutriente (QUINA; SOARES; QUINTA-FERREIRA, 2017). Contrariando a expectativa Guo et al. (2017) reportaram capacidade de sorção de $0,26 \text{ mg g}^{-1}$ com uso da casca de ovo *in natura*, baixos valores se comparados com outros sorventes avaliados. No entanto, ao realizar a calcinação e a incorporação de alumínio, o potencial de remoção aumentou para $6,23 \text{ mg g}^{-1}$, indicando a presença de outro fator de influência dos sorventes que é o tratamento no qual esses foram submetidos (ELJAMAL et al., 2013). Mesmas conclusões foram obtidos por Yang et al. (2014) e Panagiotou et al. (2018), ao realizarem, respectivamente, a calcinação do lodo de ETA e da casca de ovo, o que proporcionou aumento da área superficial.

O enriquecimento da casca de ovo com soluções de ácido clorídrico e hidróxido de sódio, também tem se mostrado promissoras como demonstrado por Ribeiro et al. (2020), que obtiveram capacidade máxima de recuperação de fósforo de 328,9 mg por grama (RIBEIRO et al., 2020). Utilizando do mesmo princípio, Yirong et al (2019), alcançaram eficiências de remoção de 96,2 % de P nas cascas colocadas em conserva (meio salino) com posterior calcinação.

Dado o favorecimento da remoção de P em lagoas com escoamento mais próximo ao fluxo em pistão, Siqueira (2018) avaliou a utilização de cascas de ovo *in natura* colocadas nas paredes de chicanas de tanques alimentados com esgoto sanitário. A configuração utilizada resultou em capacidade de sorção de 3,36 mg de P por grama, superior ao valor de Guo et al. (2017) que avaliaram o mesmo sorvente (casca de ovo não calcinada).

Semelhante a casca de ovo, as cascas de mexilhão também se apresentam como um subproduto rico em cálcio e carbonatos. Visualizando o potencial da utilização do resíduo na remoção de P, Paradelo et al (2016) avaliaram a utilização de cascas de mexilhão *in natura* e calcinada, e concluíram que as reduções da concentração de P da solução se devem tanto aos processos de adsorção e precipitação, e que a calcinação favoreceu maior capacidade de remoção da casca. Souza (2017), por outro lado, acredita que dado o número de cargas negativas e do alto poder de neutralização das cascas de mexilhão, a precipitação seja o fator preponderante.

Como outros resíduos que geraram resultados promissores, pode-se citar as conchas de ostras (MARTINS et al., 2017), caroço de coco (KRISHNAN; HARIDAS, 2008), madeira refinada de álamo (EBERHARDT et al., 2008) e o bagaço de cana (CARVALHO et al., 2011). Trabalhos têm mostrado o potencial de fornecimento da aplicação das medias reativas enriquecidas com P ou de substratos retirados de SACs, no entanto, segundo Roy (2017) mais pesquisas precisam ser feitas para entendimento da fertilização com esses materiais e do efeito sobre o solo.

8. CARVÃO ATIVADO E BIOCARVÃO

Para haver boa remoção de um sorbato é importante tanto a observação das características do sorvente quanto do meio. Propriedades como área superficial, porosidade (volume e distribuição de poros), carga superficial e a disponibilidade de sítios de ligação, além temperatura, pH e composição iônica (competição) interferem na remoção de um contaminante específico (OTHMAN et al., 2018).

Conforme discutido anteriormente, o aquecimento e a utilização de sais podem auxiliar na alteração da conformação da estrutura do material, aumentando tanto a capacidade de adsorção (por cargas) quanto de absorção (retenção nos poros). Dessa forma é feito o preparo do carvão ativado, um adsorvente universal, amplamente aplicado, que possui alta porosidade, área de superfície interna, resistência mecânica relativamente alta e elevadas eficiências de remoção (YADAV et al., 2015). Ademais, ele é comumente utilizado no tratamento de água e esgoto e filtros de gás, podendo ser produzido a partir de qualquer material carbonáceo rico em carbono elementar (KALDERIS et al., 2008).

Na literatura, pode-se encontrar a utilização de diferentes resíduos orgânicos para produção do carvão ativado como bagaço de cana, casca de arroz (KALDERIS et al., 2008), casca de coco

(BRAUN et al., 2019), casca de caranguejo (DAI et al., 2017), casca de ovo e palha de arroz (LIU et al., 2019), beterraba sacarina (YAO et al., 2011) folhas de tomate (YAO et al., 2013), caule de algodão (KRISHNA et al., (2017), bagaço de cana (LI et al, 2016b), folhas de cana-de-açúcar (LI et al., 2016a) e lodo de esgoto (AGRAFIOTI et al., 2014; YUAN et al, (2015), além produtos naturais, subprodutos e produtos artificiais (VOHLA; BAVOR; CHAZARENC, 2011) utilizando diferentes sais para ativação como Mg^{2+} (cloreto e óxido), Ca^{2+} , Zn^{2+} (cloreto) (NAKARMI et al., 2020), hidróxido de sódio, sais de ferro e alumínio.

Como ferro e alumínio são ativadores e estão presentes em grandes teores no lodo de ETA, Senador (2019) avaliou diferentes proporções de mistura entre esse resíduo (rico em Fe) e serragem de madeira, encontrando a melhor proporção de 20% do primeiro e 80% do resíduo carbonáceo.

A composição química, a estrutura dos poros e a capacidade de adsorção de um biocarvão, e conseqüentemente a remoção de P são influenciadas pela forma de preparo. Pesquisas têm apontado melhores resultados com utilização de sais de cloreto de Mg (YAO et al., 2013; LI et al., 2016b), elevadas temperaturas, da ordem de 700 °C (KALDERIS et al., 2008; AGRAFIOTI et al. (SUN et al., 2012); além de manter o pH ácido na solução de trabalho (BRAUN et al., 2019). Apesar dos elevados custos de fabricação do carvão ativado, o seu emprego possui algumas vantagens por ser considerado sustentável com benefícios econômicos e ambientais, além de favorecer a remoção de P de águas residuárias e permitir a utilização como fertilizantes nos solos agrícolas (YAO et al., 2013).

Na Tabela 2, estão apresentadas algumas informações comparativas a respeito do resíduo utilizado e das eficiências de P proporcionadas.

Tabela 1. Sistemas Alagados Construídos utilizados: meio suporte, configuração, plantas utilizadas, cargas aplicadas e eficiências obtidas.

Fonte	Cargas superficiais aplicadas de P kg ha ⁻¹ d ⁻¹	TDH (d)	Tipo de meio suporte	Configuração	Espécies vegetais utilizadas	Remoção de P (%)	OBS	
(1)	1,54	1,2	Escória de Aço	2 SAC- EHSS	Taboa	69	SACs em paralelo	
					Não plantado	68		
(2)	6,2	11,9	Brita#2 e Brita#0	3 SAC-EHSS	Não plantado	78	Água residuária de suinocultura	
	6,2	11,8			Taboa	74		
	6,1	12			Capim Tifton-85	73		
(3)	2,5	1,75	Brita#0	6 SAC EHSS	Azevém	9	Água residuária do café	
	2,8	1,75				8,8		
	3,2	1,79				15		
	2,8	1,68			Aveia Preta	4,5		
	2,9	1,64				0,5		
	3,5	1,78				0,5		
(4)	2,9	11,8	Cascalho de Ervilha	SAC- EHSS	Azevém	72,1	Aerado	Águas residuárias do café
	2,9	11,8				63,5	Não aerado	
	3,1	11,9			Não plantado	66	Aerado	
	3,0	11,8				54,3	Não Aerado	

(1) Costa et al. (2015); (2) Fia et al. (2017); (3) Fia et al. (2010); (4) Rossmann et al. (2012).

Tabela 2. Remoção de P em carvão ativado: resíduo orgânico utilizado, temperatura de ativação, ativadores utilizados e capacidade de sorção obtida.

Fonte	Resíduo utilizado	Temperatura de ativação °C	Ativadores utilizados	Capacidade de sorção (mg g ⁻¹) ou eficiência de remoção (%)
(1)	Casca de Coco	950	FeSO ₄	2,874 mg g ⁻¹
(2)	Casca de ovo e palha de arroz	800	CaO	231 mg g ⁻¹
(3)	Colheita de cana	550	MgO	121,25 mg g ⁻¹
(4)	Casca de Caranguejo	<600	CaCO ₃	26 a 11%
		>700	Ca(OH) ₂	100 a 63%
(5)	Rejeito de beterraba Sacarina digerida	600	-	73%
			Fe	22%
(6)	Folhas de tomate	600	Mg	88,5%

(1) Braun et al. (2019); (2) Liu et al (2019); (3) Li et al. (2016b); (4) Dai et al. (2017); (5) Yao et al. (2011); (6) Yao et al. (2013)

9. CONCLUSÃO

Com base na revisão realizada, observou-se que

- As remoções de fósforo (P) podem ocorrer por princípios biológicos (absorção por algas e plantas, assimilação microbiana), físicos (sedimentação de lodo), físico-químico (sorção) e químicos (precipitação) em lagoas de maturação, sistemas alagados construídos, lodos ativados, mídias reativas e carvão ativado;
- A fertirrigação é uma técnica de aproveitamento de fósforo e outros nutrientes, em que há redução dos custos com água, adubação e com tratamento de águas residuárias, além de propiciar melhoria nos atributos do solo;
- As maiores remoções ocorrem por sorção e precipitação, sendo dependente de fatores como pH, tempo de contato, composição química do sorvente e forma de preparo (temperatura de calcinação e ativadores) do carvão ativado;
- A recuperação de P de águas residuárias reduz os impactos negativos da sua presença em ambientes aquáticos e fornece o macronutrientes para solos pobres.

10. REFERÊNCIAS

- AGRAFIOTI, E. et al. Biochar production by sewage sludge pyrolysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 101, p. 72–78, maio 2013.
- AGRAFIOTI, E.; KALDERIS, D.; DIAMADOPOULOS, E. Ca and Fe modified biochars as adsorbents of arsenic and chromium in aqueous solutions. **Journal of Environmental Management**, v. 146, p. 444–450, 2014.
- AHMAD, T.; AHMAD, K.; ALAM, M. Sustainable management of water treatment sludge through 3‘R’ concept. **Journal of Cleaner Production**, v. 124, p. 1–13, jun. 2016.
- AYAZ, S. C. et al. Phosphorus removal and effect of adsorbent type in a constructed wetland system. **Desalination and Water Treatment**, v. 37, n. 1–3, p. 152–159, 2012.
- BASHAR, R. et al. Cost effectiveness of phosphorus removal processes in municipal wastewater treatment. **Chemosphere**, v. 197, p. 280–290, 2018.
- BATISTA, A. A. et al. Quality in papaya fruit produced with treated domestic sewage. **REVISTA CIÊNCIA AGRONÔMICA**, v. 48, n. 1, p. 70–80, 2017.
- BEDBABIS, S. et al. Effects of irrigation with treated wastewater on olive tree growth, yield and leaf mineral elements at short term. **Scientia Horticulturae**, v. 126, n. 3, p. 345–350, set. 2010.

BLUM, J. et al. Nitrogen and phosphorus leaching in a tropical Brazilian soil cropped with sugarcane and irrigated with treated sewage effluent. **Agricultural Water Management**, v. 117, n. C, p. 115–122, jan. 2013.

BOUZA-DEAÑO, R.; SALAS-RODRÍGUEZ, J. J. Distribution and spatial variability of sludges in a wastewater stabilization pond system without desludging for a long period of time. **Ecological Engineering**, v. 50, p. 5–12, 2013.

BRAUN, J. C. A. et al. Phosphorus adsorption in Fe-loaded activated carbon: Two-site monolayer equilibrium model and phenomenological kinetic description. **Chemical Engineering Journal**, v. 361, p. 751–763, abr. 2019.

CAMPO, R. et al. Efficient carbon, nitrogen and phosphorus removal from low C/N real domestic wastewater with aerobic granular sludge. **Bioresource Technology**, v. 305, p. 0960–8524, 2020.

CARVALHO, W. S. et al. Phosphate adsorption on chemically modified sugarcane bagasse fibres. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 9, p. 3913–3919, out. 2011.

CHA, J. S. et al. Production and utilization of biochar: A review. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 40, p. 1–15, ago. 2016.

CHAGAS, R.C.; MATOS, A.T.; CECON, P.R.; LO MONACO, P.A.V.; FRANÇA, L. G. . Cinética de remoção de matéria orgânica em sistemas alagados construídos cultivados com lírio amarelo. . **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 11, p. 1186–1192, 2011.

CHAGAS, R.C.; MATOS, A.T.; CECON, P.R.; LO MONACO, P.A.V.; ZAPAROLLI, B. . Remoção de coliformes em sistemas alagados construídos cultivados com lírio-amarelo (*Hemerocallis fava*). **Engenharia na Agricultura**, v. 20, n. 2, p. 142–150, 2012.

CHENG, X. et al. Effectiveness of phosphate removal during anaerobic digestion of waste activated sludge by dosing iron(III). **Journal of Environmental Management**, v. 193, p. 32–39, 2017.

CIEŚLIK, B.; KONIECZKA, P. A review of phosphorus recovery methods at various steps of wastewater treatment and sewage sludge management. The concept of “no solid waste generation” and analytical methods. **Journal of Cleaner Production**, v. 12, n. 4, p. 1728–1740, 2017.

COSTA, J.F.; MARTINS, W.L.P.; SEIDL, M.; VON SPERLING, M. Role of vegetation (*Typha latifolia*) on nutrient removal in a horizontal subsurface-flow constructed wetland treating UASB reactor-trickling filter effluent. **Water Science and Technology**, v. 71, p. 1004–

1010, 2015.

COSTA, F. G. B. et al. Desenvolvimento inicial de cultivares de melão fertirrigadas com distintas proporções de esgoto doméstico em Mossoró-RN. **Revista Caatinga**, v. 27, n. 2, p. 116–123, 2014.

CUBA, R. D. S. et al. Potencial de efluente de esgoto doméstico tratado como fonte de água e nutrientes no cultivo hidropônico de alface. **Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 10, n. 3, p. 575–586, 3 jul. 2015.

DA SILVA, F. J. A. et al. Prospectus of waste stabilization ponds in Ceará, Northeast Brazil. **Water Science and Technology**, v. 63, n. 6, p. 1265–1270, 1 mar. 2011.

DAI, H. et al. An efficient approach for phosphorus recovery from wastewater using series-coupled air-agitated crystallization reactors. **Chemosphere**, v. 165, p. 211–220, 2016.

DAI, L. et al. Calcium-rich biochar from the pyrolysis of crab shell for phosphorus removal. **Journal of Environmental Management**, v. 198, p. 70–74, ago. 2017.

DANESHGAR, S. et al. The Potential Phosphorus Crisis: Resource Conservation and Possible Escape Technologies: A Review. **Resources**, v. 7, n. 2, p. 37, 2 jun. 2018.

DELIBERAÇÃO NORMATIVA CERH-MG Nº 65, DE 18 DE JUNHO DE 2020. Estabelece diretrizes, modalidades e procedimentos para o reúso direto de água não potável, proveniente de Estações de Tratamento de Esgotos Sanitários (ETE) de sistemas públicos e privados.

DE MATOS, M. P. et al. Clogging and performance of horizontal subsurface flow constructed wetlands over eight years of operation. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 23, n. 6, p. 1227–1237, 2018.

DE SOUZA, D. P. et al. Influência da fertirrigação por sulco utilizando Água residuária e diferentes níveis de adubação na produtividade do feijoeiro. **Irriga**, v. 20, n. 2, p. 348–362, 2015.

DESMIDT, E. et al. Global phosphorus scarcity and full-scale P-recovery techniques: A review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 45, n. 4, p. 336–384, 2015a.

DESMIDT, E. et al. Global Phosphorus Scarcity and Full-Scale P-Recovery Techniques: A Review? **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 45, n. 4, p. 336–384, 2015b.

DIAS, D. D. et al. Overall performance evaluation of shallow maturation ponds in series treating UASB reactor effluent: Ten years of intensive monitoring of a system in Brazil. **Ecological Engineering**, v. 71, p. 206–214, 2014.

DU, L. et al. Phosphorus removal performance and biological dephosphorization process in treating reclaimed water by Integrated Vertical-flow Constructed Wetlands (IVCWs). **Bioresource Technology**, v. 243, p. 204–211, 2017.

EBERHARDT, T. L.; MIN, S. Biosorbents prepared from wood particles treated with anionic polymer and iron salt: Effect of particle size on phosphate adsorption. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 3, p. 626–630, fev. 2008.

EGLE, L. et al. Phosphorus recovery from municipal wastewater: An integrated comparative technological, environmental and economic assessment of P recovery technologies. **Science of the Total Environment**, v. 571, p. 522–542, 2016.

ELJAMAL, O. et al. Phosphorus sorption from aqueous solution using natural materials. **Environmental Earth Sciences**, v. 68, n. 3, p. 859–863, 2013.

FIA, R.; MATOS, A. T.; FIA, F. R. L.; MATOS, M. P.; LAMBERT, T. F.; NASCIMENTO, F. S. Desempenho de forrageiras em sistemas alagados de tratamento de águas residuárias do processamento do café. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, p. 842–847, 2010.

FIA, F. R. L. et al. Efeito da vegetação em sistemas alagados construídos para tratar águas residuárias da suinocultura. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 22, n. 2, p. 303–311, 2017.

FREITAS, C. A. S. DE et al. Efluente de esgoto doméstico tratado e reutilizado como fonte hídrica alternativa para a produção de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 7, p. 727–734, jul. 2013.

GARCIA, G. O. et al. Propriedades químicas de um solo cultivado com duas forrageiras fertirrigadas com esgoto doméstico tratado. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, v. 7, p. 737–742, 20 dez. 2012.

GEBREMARIAM, S. Y. et al. Research Advances and Challenges in the Microbiology of Enhanced Biological Phosphorus Removal-A Critical Review. **Water Environment Research**, v. 83, n. 3, p. 195–219, 2011.

GENG, Y. et al. Electricity generation and in situ phosphate recovery from enhanced biological phosphorus removal sludge by electrodialysis membrane bioreactor. **Bioresource Technology**, v. 247, p. 471–476, 2018.

GREENWAY, M. The role of macrophytes in nutrient removal using constructed wetlands. **Environmental Bioremediation Technologies**, p. 331–351, 2007a.

GREENWAY, M. The Role of Macrophytes in Nutrient Removal using Constructed Wetlands.

In: **Environmental Bioremediation Technologies**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007b. p. 331–351.

GUIMARÃES, J. J. et al. UTILIZAÇÃO DE FORRAGEIRA NO TRATAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTICO. **Irriga**, v. 1, n. 1, p. 92–100, 2018.

GUO, Z. et al. Phosphorus removal from aqueous solution in parente and aluminum-modified eggshells: thermodynamics and kinetics, adsorption mechanism, and diffusion process. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, p. 14525-14536, abr. 2017.

HENRIQUE, I. N.; SUSANA, B.; CEBALLOS, O. DE. Remoção biológica de fósforo em reatores em bateladas sequenciais com diferentes tempos de retenção de sólidos. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 15, p. 1–13, 2020.

JEREMY, A. Luxury Uptake of Phosphorus by Microalgae in New Zealand Waste Stabilisation Ponds A Thesis presented in partial fulfilment of the requirements for the degree of Masters In Engineering At Massey University , Manawatu New Zealand Aidan Jeremy Crimp. p. 1–83, 2016.

JESUS, F. L. F. DE. Desenpenho e Influência dos Capins Tifton 85(Cynodon sp.) e Vetiver (Chrysopogon zizanioides) no Tratamento de Esgotos Sanitários em Sistemas Alagados Construídos. **Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de Magister Scientiae. Obtido a 23 de fevereiro de 2019**, v. 1, n. 0, p. 113, 2016.

KADLEC, R. H.; WALLACE, S. **Treatment wetlands**. 2. ed. Florida: [s.n.].

KALDERIS, D. et al. Production of activated carbon from bagasse and rice husk by a single-stage chemical activation method at low retention times. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 15, p. 6809–6816, out. 2008.

KLEIN, C.; AGNE, S. A. A. Fósforo: De Nutriente À Poluente! **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 8, n. 8, p. 1713–1721, 2013.

KOK, D. J. D. et al. Global phosphorus recovery from wastewater for agricultural reuse. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 22, n. 11, p. 5781–5799, 2018.

KRISHNA VENI, D. et al. Biochar from green waste for phosphate removal with subsequent disposal. **Waste Management**, v. 68, p. 752–759, out. 2017.

KRISHNAN, K. A.; HARIDAS, A. Removal of phosphate from aqueous solutions and sewage using natural and surface modified coir pith. **Journal of Hazardous Materials**, v. 152, n. 2, p. 527–535, abr. 2008.

LAHIRI, S.; GHOSH, D.; SARKAR, D. Biogeochemical cycling bacteria and nutrient dynamics in waste stabilization pond system. **Wastewater Management Through Aquaculture**, p. 29–52, 2018.

LATIF, M. A.; MEHTA, C. M.; BATSTONE, D. J. Low pH anaerobic digestion of waste activated sludge for enhanced phosphorous release. **Water Research**, v. 81, p. 288–293, 2015.

LI, M.; YANG, Y. A Cross-Cultural Study on a Resilience-Stress Path Model for College Students. **Journal of Counseling & Development**, v. 94, n. 3, p. 319–332, jul. 2016.

LI, R. et al. Enhancing phosphate adsorption by Mg/Al layered double hydroxide functionalized biochar with different Mg/Al ratios. **Science of The Total Environment**, v. 559, p. 121–129, jul. 2016a.

LI, R. et al. Recovery of phosphate from aqueous solution by magnesium oxide decorated magnetic biochar and its potential as phosphate-based fertilizer substitute. **Bioresource Technology**, v. 215, p. 209–214, set. 2016b.

LI, X. et al. Facile method to granulate drinking water treatment residues as a potential media for phosphate removal. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 586, p. 124198, fev. 2020.

LIU, J. et al. Comparison of pretreatment methods for phosphorus release from waste activated sludge. **Chemical Engineering Journal**, v. 368, p. 754–763, 2019.

LIU, X.; SHEN, F.; QI, X. Adsorption recovery of phosphate from aqueous solution by CaO-biochar composites prepared from eggshell and rice straw. **Science of The Total Environment**, v. 666, p. 694–702, maio 2019.

MARQUES, M. V. A. Dinâmica e distribuição dos nutrientes do efluente do tratamento preliminar de esgoto doméstico no solo quando aplicado em sulcos na fertirrigação do capim-elefante. p. 79, 2017.

MARTINS, M. C.; SANTOS, E. B. H.; MARQUES, C. R. First study on oyster-shell-based phosphorous removal in saltwater — A proxy to effluent bioremediation of marine aquaculture. **Science of The Total Environment**, v. 574, p. 605–615, jan. 2017.

MATEUS, D. M. R.; VAZ, M. M. N.; PINHO, H. J. O. Fragmented limestone wastes as a constructed wetland substrate for phosphorus removal. **Ecological Engineering**, v. 41, p. 65–69, abr. 2012.

MATOS, A. T. DE et al. Capacidade extratora de plantas em sistemas alagados utilizados no tratamento de águas residuárias de laticínios. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e**

Ambiental, v. 14, n. 12, p. 1311–1317, 2010.

MATOS, A. T. **Tratamento e aproveitamento agrícola de resíduos sólidos**. 1ª ed. Viçosa: Editora UFV, 2014.

MATOS, A. T.; MATOS, M. P. **Disposição de águas residuárias no solo e em sistemas alagados construídos**. 1. ed. Viçosa: UFV, 371 p., 2017.

MAYNARD, H. E.; OUKI, S. K.; WILLIAMS, S. C. Tertiary lagoons: A review of removal mechanisms and performance. **Water Research**, v. 33, n. 1, p. 1–13, 1999.

MEDEIROS, S. D. S. et al. Utilização de água residuária de origem doméstica na agricultura: Estudo do estado nutricional do cafeeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 2, p. 109–115, 2008.

MOHAN, D. et al. Organic and inorganic contaminants removal from water with biochar, a renewable, low cost and sustainable adsorbent – A critical review. **Bioresource Technology**, v. 160, p. 191–202, maio 2014.

NAKARMI, A. et al. Benign zinc oxide betaine-modified biochar nanocomposites for phosphate removal from aqueous solutions. **Journal of Environmental Management**, v. 272, n. 3, p. 111048, out. 2020.

OLIVEIRA, P. C. P. DE et al. Produção de moranga irrigada com esgoto doméstico tratado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 8, p. 861–867, 2013.

OTHMAN, A. et al. Nanoporous Sorbents for the Removal and Recovery of Phosphorus from Eutrophic Waters: Sustainability Challenges and Solutions. **ACS Sustainable Chemistry and Engineering**, v. 6, n. 10, p. 12542–12561, 2018.

PANAGIOTOU, E. et al. Turning calcined waste egg shells and wastewater to Brushite: Phosphorus adsorption from aqua media and anaerobic sludge leach water. **Journal of Cleaner Production**, v. 178, p. 419–428, mar. 2018.

PANTANO, G. et al. Sustainability in phosphorus use: A question of water and food security. **Quimica Nova**, v. 39, n. 6, p. 732–740, 2016.

PARADELO, R. et al. Phosphorus removal from wastewater using mussel shell: Investigation on retention mechanisms. **Ecological Engineering**, v. 97, p. 558–566, dez. 2016.

PEREIRA, M. S. et al. Decaimento de bactérias do grupo coliformes em solos com cobertura vegetal e nu. **Engenharia na Agricultura**, v. 22, p. 575-582, n. 2014.

POSSMOSER-NASCIMENTO, T. E. et al. Sludge accumulation in shallow maturation ponds treating UASB reactor effluent: Results after 11 years of operation. **Water Science and**

Technology, v. 70, n. 2, p. 321–328, 2014.

PRATA, R. C. C.; MATOS, A. T.; CECOM, P. R.; LO MANACO, P. A. V.; PIMENTA, L. Tratamento de esgoto sanitário em sistemas alagados construídos cultivados com lírio-amarelo. **Engenharia Agrícola**, v. 33, n. 6, p. 1144–1155, 2013.

PRONK, M. et al. Full scale performance of the aerobic granular sludge process for sewage treatment. **Water Research**, v. 84, p. 207–217, 2015.

QUEIROZ, A. A. DE; QUEIROZ, S. O. P. DE; ARAGÃO, C. A. Reuso de efluentes domésticos na irrigação por gotejamento do tomareiro. **Pesquisa Agropecuária Pernambucana**, v. 20, n. 1, p. 36–42, 2015.

QUINA, M. J.; SOARES, M. A. R.; QUINTA-FERREIRA, R. Applications of industrial eggshell as a valuable anthropogenic resource. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 123, p. 176–186, ago. 2017.

REBOUÇAS, J. R. L. et al. Crescimento Do Feijão-Caupi Irrigado Com Água Residuária De. **Revista Caatinga**, v. 23, p. 97–102, 2010.

RIBEIRO, I. C. A. et al. Hydroxyl-eggshell: A novel eggshell byproduct highly effective to recover phosphorus from aqueous solutions. **Journal of Cleaner Production**, v. 274, p. 123042, nov. 2020.

ROSSMANN, M.; MATOS, A.T.; ABREU, E.C.; SILVA, F.F.E; BORGES, A. C. Performance of constructed wetlands in the treatment of aerated coffee processing wastewater: removal of nutrients and phenolic compounds. **Ecological Engineering**, v. 49, p. 264–269, 2012.

ROY, E. D. Phosphorus recovery and recycling with ecological engineering: A review. **Ecological Engineering**, v. 98, p. 213–227, 2017.

ROZARI, P. DE; GREENWAY, M.; HANANDEH, A. EL. Phosphorus removal from secondary sewage and septage using sand media amended with biochar in constructed wetland mesocosms. **Science of the Total Environment**, v. 569–570, p. 123–133, 2016.

SALGADO, V. C. et al. Watermelon cultivation in the semi-arid irrigated with different heights of treated domestic sewage. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 23, n. 4, p. 727–738, 2018.

SANTOS, S. S. DOS et al. Contaminação Microbiológica Do Solo E Dos Frutos De Cafeeiros Fertirrigados Com Esgoto Sanitário. **Engenharia na Agricultura**, v. 14, n. May 2014, p. 16–22, 2006.

SANTOS, A. F. et al. Recovery of phosphate from aqueous solutions using calcined eggshell as an eco-friendly adsorbent. **Journal of Environmental Management**, v. 238, p. 451–459, maio

2019.

SARMENTO, A. P.; BORGES, A. C.; DE MATOS, A. T. Effect of cultivated species and retention time on the performance of constructed wetlands. **Environmental Technology (United Kingdom)**, v. 34, n. 8, p. 961–965, 2013.

SARTORIUS, C.; VON HORN, J.; TETTENBORN, F. Phosphorus Recovery from Wastewater-Expert Survey on Present Use and Future Potential. **Water Environment Research**, v. 84, n. 4, p. 313–322, abr. 2012.

SENADOR, N. S. **Remoção de fósforo em biocarvões modificados com lodo de estação de tratamento de água**. 2019. 15p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2018.

SHEMER, H.; ARMUSH, A.; SEMIAT, R. Reusability of iron oxyhydroxide agglomerates adsorbent for repetitive phosphate removal. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 579, p. 123680, out. 2019.

SIBRELL, P. L. et al. Removal of phosphorus from agricultural wastewaters using adsorption media prepared from acid mine drainage sludge. **Water Research**, v. 43, n. 8, p. 2240–2250, maio 2009.

SIQUEIRA, J. C. **Avaliação do potencial de remoção de fósforo de esgoto sanitário por meio de diferentes formas de contato com cascas trituradas de ovo de galinha**. 2018. 29 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2019.

SILVA, V. SOUZA. DA. **Avaliação do potencial para adubação verde com a parte aérea de espécies vegetais cultivadas em sistemas alagados construídos no tratamento de esgoto sanitário**. 2018. 57 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2018.

SOUSA NETO, O. N. et al. Fertigação do algodoeiro utilizando efluente doméstico tratado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 2, p. 200–208, 2012.

SOUZA, E. J. DE et al. Níveis de adubação no cultivo de melancia irrigado com esgoto. **Revista DAE**, v. 65, n. 207, p. 94–106, 2017.

SOUZA, D. A. **Avaliação da capacidade de remoção de fósforo por esgotos domésticos pelo uso de cascas trituradas**. 2017. 54 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.

SUN, H. et al. Multiple Controls on the Chemical and Physical Structure of Biochars.

Industrial & Engineering Chemistry Research, v. 51, n. 9, p. 3587–3597, 7 mar. 2012.

TALBOYS, P. J. et al. Struvite: a slow-release fertiliser for sustainable phosphorus management? **Plant and Soil**, v. 401, n. 1–2, p. 109–123, 2016.

TERVAHAUTA, T. et al. Calcium phosphate granulation in anaerobic treatment of black water: A new approach to phosphorus recovery. **Water Research**, v. 48, n. 1, p. 632–642, 2014.

UCHIMIYA, M.; HIRADATE, S.; ANTAL, M. J. Dissolved Phosphorus Speciation of Flash Carbonization, Slow Pyrolysis, and Fast Pyrolysis Biochars. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 3, n. 7, p. 1642–1649, 6 jul. 2015.

VAIBHAV SRIVASTAVA, BARKHA VAISH, ANITA SINGH, R. P. S. Nutrient recovery from municipal waste stream: status and prospects Vaibhav. In: **Urban Ecology**. [s.l.] Elsevier Inc., 2020. p. 265–297.

VERHOFSTAD, M. J. J. M. et al. Finding the harvesting frequency to maximize nutrient removal in a constructed wetland dominated by submerged aquatic plants. **Ecological Engineering**, v. 106, p. 423–430, 2017.

VOHLA, C.; BAVOR, H. J.; CHAZARENC, F. Filter materials for phosphorus removal from wastewater in treatment wetlands—A review. **Ecological Engineering**, v. 37, p. 70–89, 2011.

VON SPERLING, M. **Lagoas de estabilização: Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias**. 2. ed. Belo Horizonte: [s.n.].

VON SPERLING, M. **Lodos ativados**. [s.l.: s.n.]. v. 4

VYMAZAL, J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. **Science of the Total Environment**, v. 380, n. 1–3, p. 48–65, 2007.

WANG, C. et al. Recycling of drinking water treatment residue as an additional medium in columns for effective P removal from eutrophic surface water. **Journal of Environmental Management**, v. 217, p. 363–372, jul. 2018.

WEI, Z. et al. Clarification of phosphorus fractions and phosphorus release enhancement mechanism related to pH during waste activated sludge treatment. **Bioresource Technology**, v. 222, p. 217–225, 2016.

WESTERN CONSORTIUM FOR PUBLIC HEALTH. **The City of San Diego Total Resource Recovery Project Health Effects Study**. Final Summary Report, Oakland, CA., 1992.

WU, L. et al. Phosphorus and short-chain fatty acids recovery from waste activated sludge by anaerobic fermentation: Effect of acid or alkali pretreatment. **Bioresource Technology**, v. 240,

p. 192–196, 2017.

YADAV, D. et al. Adsorptive removal of phosphate from aqueous solution using rice husk and fruit juice residue. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 94, p. 402–409, mar. 2015.

YANG, Y. et al. Characteristics and mechanisms of phosphate adsorption on dewatered alum sludge, **Separation and Purification Technology**, v.51, p. 193-200, 2006.

YANG, L. et al. Reuse of acid coagulant-recovered drinking waterworks sludge residual to remove phosphorus from wastewater. **Applied Surface Science**, v. 305, p. 337–346, 2014.

YAO, Y. et al. Biochar derived from anaerobically digested sugar beet tailings: Characterization and phosphate removal potential. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 10, p. 6273–6278, maio 2011.

YAO, Y. et al. Engineered carbon (biochar) prepared by direct pyrolysis of Mg-accumulated tomato tissues: Characterization and phosphate removal potential. **Bioresource Technology**, v. 138, p. 8–13, jun. 2013.

YIRONG, C.; VAURS, L. Wasted salted duck eggshells as an alternative adsorbent for phosphorus removal. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 7, n. 6, p. 103443, dez. 2019.

YUAN, H. et al. Influence of pyrolysis temperature on physical and chemical properties of biochar made from sewage sludge. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 112, p. 284–289, mar. 2015.

YUAN, Z.; PRATT, S.; BATSTONE, D. J. Phosphorus recovery from wastewater through microbial processes. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 23, p. 878–883, 2012.

ZHAO, B. et al. Granular ferric hydroxide adsorbent for phosphate removal: demonstration preparation and field study. **Water Science and Technology**, v. 72, n. 12, p. 2179–2186, 16 dez. 2015.