

Reciclagem biológica do fósforo a partir do efluente suíno originário da biodigestão anaeróbia: uma revisão

Costa, A.A.^{1@}; Lima, E.S.² e Soto, F.R.M.¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - Campus São Roque, Brasil.

²Centro Universitário das Faculdades Metropolitanas Unidas (FMU | FIAM-FAAM), Brasil.

PALAVRAS CHAVE ADICIONAIS

Bactéria.
Produtor rural.
Segurança alimentar.
Suinocultura.
Sustentabilidade.

ADDITIONAL KEYWORDS

Bacteria.
Sustainability.
Food security.
Rural producer.
Swine Farm.

INFORMATION

Cronología del artículo.
Recibido/Received: 05.07.2020
Aceptado/Accepted: 22.08.2020
On-line: 15.10.2020
Correspondencia a los autores/Contact e-mail:
adrianocosta1405@hotmail.com

INTRODUÇÃO

A suinocultura apresenta grande importância econômica para o Brasil, com papel de destaque na cadeia da agroindústria nacional e internacional (Silva et al. 2015). Seu crescimento levou ao surgimento de granjas

RESUMO

O efluente suíno (ES) apresenta elevado potencial poluidor, pois, mesmo após o processo de biodigestão anaeróbia, contém ainda concentrações variáveis de nutrientes, especialmente de fósforo (P). Este trabalho teve como objetivo investigar por meio de uma revisão de literatura a reciclagem biológica do P como alternativa para o tratamento de ES originário da biodigestão anaeróbia. Observou-se que o processo denominado de remoção biológica reforçada de fosfatos consiste no método mais utilizado na remoção do P presente em efluentes. Ele consiste na ciclagem da biomassa através de ambientes aeróbios e anaeróbios e envolve a incorporação do P no interior da célula das bactérias e, a subsequentemente remoção da massa enriquecida com P no lodo. Apesar de existirem muitos aspectos a serem esclarecidos a respeito destas tecnologias, destaca-se que a reciclagem e a recuperação do P presente no ES representam importantes avanços na promoção da sustentabilidade no uso deste recurso que está ligado diretamente à segurança alimentar global.

Biological recycling of phosphorus from the swine effluent originating in anaerobic digestion: a revision

SUMMARY

The swine effluent (SE) has a high pollution potential, because even after the process of anaerobic digestion, still contains variable concentrations of nutrients, especially of phosphorus (P). This study aimed to investigate through a literature review the biological recycling of P as an alternative for the treatment of SE originating in anaerobic digestion. It was observed that the process known as enhanced biological phosphate removal is the method most used in the removal of P present in effluent. It consists in cycling biomass through aerobic and anaerobic environments and involves the incorporation of P into the cell of bacteria and subsequently the mass removal enriched with P in the slime. Although there are many aspects to be informed about these technologies, it is emphasized that the recycling and recovery of P present in the SE represent important advances in promoting sustainability in the use of this resource that is directly linked to global food security.

altamente tecnificadas que permitiu a produção cada vez maior deste tipo de proteína em áreas cada vez menores. Entretanto, estas mudanças levaram a geração crescente de efluente suíno (ES) na forma concentrada (Costa e Soto 2018).

O ES possui potencial poluidor devido à alta concentração de matéria orgânica e a presença de patógenos que representam riscos sanitários e ambientais (Sá et al. 2014). A degradação não controlada do ES, além de gerar danos ao bem-estar social devido à geração de odores e a proliferação de vetores de doenças, contribui para a perda da qualidade dos corpos receptores e leva a liberação de gases que atuam na intensificação do efeito estufa (Silva e Amaral 2013).

Neste contexto, a biodigestão anaeróbia é apontada como uma importante forma de tratamento do ES nas suas etapas iniciais (Halmeman 2014). Ela consiste em um processo natural e controlado, que ocorre na ausência de oxigênio, onde micro-organismos anaeróbios degradam a matéria orgânica transformando-a, principalmente, em biogás e biofertilizante (Suárez et al. 2014; Kleinstauber 2014).

No entanto, apesar do reconhecido avanço científico e tecnológico no tratamento do ES por meio da biodigestão anaeróbia e a geração de produtos de valor agregado, o ES após a passagem por este processo ainda possui potencial poluidor. Esta situação se deve, principalmente, ao fato do processo não remover completamente as cargas de nutrientes presentes no efluente que podem levar a ocorrência de desequilíbrios ambientais (Capoane et al. 2015).

O fósforo (P) é um dos elementos presentes no ES pós biodigestão que mais contribui para o evento da eutrofização de rios e lagos (Klein e Agne 2012; Bali e Gueddari, 2019). Por outro lado, o nutriente é um recurso natural, não renovável, indispensável para a presença e manutenção de todas formas de vida na Terra, sendo desconhecido algum ser vivo que não o utilize em algum processo (Domingos et al. 2003; Horta 2015). Portanto, é fundamental para o agronegócio, para o fornecimento de alimentos e para a saúde humana (Suh e Yee 2011).

Apesar de sua ampla distribuição na natureza, o P não é encontrado em ambientes naturais em sua forma elementar. Geralmente, nestes sistemas, como água e solo, o P encontra-se como fosfato (Van Raij 1991; Klein e Agne 2012). A disponibilização ocorre por meio do intemperismo das rochas e da mineralização realizada pelos micro-organismos. Assim, o P é assimilado pelas plantas e transferido na cadeia trófica ou no processamento do produto vegetal (Mullins 2009; Martinez et al. 2015).

No entanto, na maioria dos solos, a disponibilidade deste elemento é limitada, o que faz com que os sistemas de produção agrícola e a consequente exportação dos alimentos levem a exaustão do recurso no meio. Diante disto, na maioria dos casos, são utilizadas fontes fosfatadas como formas para aumentar o P disponível nos solos (Van Vuuren et al. 2010; Ashley et al. 2011). A formulação empregada recorrentemente é o fertilizante NPK (nitrogênio, fósforo e potássio) (Aruda et al., 2015).

O principal mecanismo de obtenção do P é a extração do mineral a partir de rochas que através da mineração e o beneficiamento do minério tornam a produção de fosfato uma atividade de elevado impacto

ambiental (Silveira e Silveira 2015), além de comprometer o estoque deste recurso. Alguns países como Marrocos, Estados Unidos da América, Jordânia, África do Sul e China detêm juntos, aproximadamente 85% das reservas de rochas fosfáticas do mundo. No Brasil, as rochas fosfáticas são estimadas em 315 milhões de toneladas (Brasil 2014).

No ano de 2018 a produção mundial de rocha fosfática foi de 270 milhões de toneladas, com destaque neste cenário para China, Estados Unidos, Marrocos e Saara Ocidental. Neste mesmo ano o Brasil produziu cerca de 5,2 milhões de toneladas (U.S. Geological Survey 2019).

A demanda por este recurso essencial cresce de forma gradual. De acordo com levantamento realizado pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (U.S. Geological Survey, 2019) a estimativa é que no ano de 2022 o consumo mundial de P aumente para 50,5 milhões de toneladas, sendo que para o ano de 2018 o esperado era de 47,0 milhões de toneladas. Deste crescimento projetado, África, Índia e América do Sul representariam 75%.

No âmbito da suinocultura, este mineral é essencial na dieta animal. Trata-se de uma das principais exigências nutricionais dos suínos em suas diferentes fases de desenvolvimento. No entanto, por outro lado, o elemento é apontado como um dos três nutrientes mais caros nas formulações de rações para monogástricos (Zardo e Lima 1999; Bünzen et al. 2012). De acordo com Nieto et al. (2017) o custo com a suplementação do mineiral na formulação da dieta pode alcançar valores de 50 a 75% do custo total da mistura mineral.

Devido à expansão dos setores ligados ao agronegócio, com demanda crescente de fosfato, e o tempo de ciclagem do P que se completa em uma escala de milhões de anos (Aduan et al. 2004) torna-se imperativo, pois, mobilizar novas fontes do nutriente para garantir a continuidade da produção e oferta de alimentos.

Neste cenário, alcançar eficiência elevada na reciclagem do P da produção, como dos efluentes suínos, além de contribuir para a proteção da qualidade dos corpos hídricos, reduziria substancialmente a demanda por P de origem mineral, o que permitiria alongar a vida útil das reservas minerais existentes e passa a ter grande significado para a saúde pública e o meio ambiente.

Diante deste contexto, o presente trabalho teve como objetivo investigar por meio de revisão de literatura a reciclagem biológica do P como alternativa para o tratamento do ES originário da biodigestão anaeróbia.

SUINOCULTURA E O FÓSFORO: IMPLICAÇÕES AMBIENTAIS

A suinocultura possui grande importância econômica para o Brasil, com papel de destaque na cadeia de agroindústria nacional e internacional (Silva et al. 2015). O país é o quarto maior exportador de carne suína do mundo (Broetto et al. 2015). No ano de 2019, o Brasil alcançou uma produção de 3,98 milhões de toneladas de carne suína (ABPA 2020).

Este destaque da suinocultura brasileira é devido o fato de o país conter condições geográficas e climáticas favoráveis para a criação de suínos. Arelado a este fator, houve aumento na demanda por este tipo de proteína animal o que levou os produtores a investirem em avanços tecnológicos, tornando a atividade mais tecnificada e especializada, gerando assim melhor desempenho na produção (Andreazzi et al. 2015).

Entretanto, com o emprego de novas tecnologias que permitiram a criação de animais de forma intensiva em áreas cada vez menores, surgiu um importante passivo ambiental atrelado ao seu desenvolvimento, devido à geração de grande quantidade de dejetos (Bühning e Silveira 2016). Os dejetos de suínos produzidos nas granjas são compostos por fezes, urina, água perdida pelos bebedouros e na higienização, resíduos de ração, pelos, poeira e demais materiais resultantes do processo de criação. Estima-se que a produção, em média de dejetos líquidos por suíno por dia seja de 7,0 a 8,0 L, o que em nível de comparação é equivalente a aproximadamente quatro vezes o volume produzido pela população humana (Schultz 2007; Andreazzi et al. 2015; Silva et al. 2015).

Neste contexto, no que se refere à questão ambiental, a suinocultura é considerada uma atividade potencialmente poluidora, visto que ela gera diariamente um elevado volume de dejetos com altos teores de nutrientes e de micro-organismos que podem ser patogênicos (Loch et al. 2016). Estes elementos, caso não sejam manejados ou tratados da forma ambientalmente adequada, podem ocasionar danos ambientais por meio da contaminação de solos, diminuição da biodiversidade e perda de qualidade de corpos hídricos por meio da eutrofização, liberação de gases do efeito estufa, dispersão de eventuais patógenos, morte de peixes e outros animais, proliferação de odores, dentre outros (Genova et al. 2015). Desta forma, a destinação inadequada destes dejetos pode causar uma série de impactos ambientais, sociais, sanitários e econômicos, afetando diretamente a qualidade de vida e o bem-estar da população (Barbosa e Langer 2011; Carvalho et al. 2015).

No que tange aos impactos ligados aos solos, nota-se que na maioria dos casos o dejetos suíno é utilizado como fertilizante agrícola. A aplicação do ES nos solos, em quantidades excessivas e continuadas leva a saturação do corpo por meio do acúmulo principal de macronutrientes (P e N) e micronutrientes como o zinco e cobre, elementos altamente reativos e bioacumuláveis, que em doses elevadas são tóxicos (altera processos metabólicos, membranas e organelas celulares, dentre outros) aos vegetais e micro-organismos. Ademais, existe ainda o risco do escoamento dos nutrientes que pode levar ao enriquecimento nutricional das águas superficiais (Allene e Mallarino 2008; Giroto et al. 2010; Alexandre et al. 2012) corroborando com a eutrofização artificial do ambiente.

A eutrofização é um dos principais processos danosos aos recursos naturais decorrente da disposição inadequada dos dejetos de suínos em corpos hídricos. Ela pode ser definida como um processo de enriquecimento nutricional excessivo da água caracterizado pelo

crescimento exagerado da população de cianobactérias que aumentam a demanda por oxigênio nos corpos receptores, podendo ocasionar a morte de outros seres vivos nestes locais. Geralmente, as fontes de nutrientes são fertilizantes agrícolas, águas pluviais de cidades, detergentes, rejeitos de minas e dejetos de origem humana ou animal (Klein e Agne, 2012).

Desta forma, este processo que leva a perda de vida e qualidade dos corpos hídricos, pode ser resultado da deposição inadequada de ES nos corpos receptores, visto que este tipo de efluente possui altas taxas de concentração de minerais que estimulam o crescimento de algas contaminando o corpo hídrico (Kunz et al. 2010; Medeiros et al. 2011; Motteran et al. 2013).

O P é um dos principais elementos presentes no ES que pode contribuir para o evento da eutrofização de rios e lagos. Esta situação decorre do fato dele estar presente em concentrações mais altas que os outros elementos no ES e de apresentar grande solubilidade, o que permite grande mobilidade no meio ambiente. O aumento da concentração de fosfatos faz com que as cianobactérias se proliferem de forma acelerada impactando negativamente nos diferentes usos deste recurso, seja para consumo ou recreação ou para a própria sobrevivência de comunidades aquáticas (Klein e Agne 2012).

Embasada neste potencial de degradação ambiental, a legislação ambiental brasileira requer que o desenvolvimento da atividade suinícola possua licenças ambientais, através da qual são exigidas adequações para evitar que a implantação dos empreendimentos causem danos ao ambiente. Dentre as medidas necessárias, destaca-se a necessidade de implantação de medidas de controle da poluição ambiental, relacionada principalmente aos dejetos suínos (Palhares 2008).

Diante deste contexto, com o intuito de tornar a suinocultura mais sustentável e de promover a qualidade ambiental, ao longo do tempo foram desenvolvidas tecnologias visando o tratamento adequado dos DS. De fato, tecnologias como a biodigestão anaeróbia que promove a decomposição da matéria orgânica transformando-a em biogás e biofertilizante, são eficientes no tratamento do ES em suas etapas iniciais, removendo grande parte da matéria orgânica e diminuindo micro-organismos com potencial de patogenicidade (Duarte Neto et al. 2010; Halmeman 2014).

O ES tratado pelo processo de biodigestão anaeróbia possui características importantes em termos de fertilização. O produto contém elementos solúveis que são nutrientes para as plantas, com destaque para o N e o P, além de diversos micronutrientes. Porém, além das dificuldades de mensuração exata dos nutrientes para a aplicação, o ES tratado não pode ser descartado diretamente em corpos receptores, sem a realização de depuração prévia (Silva et al. 2012).

Diante disto, nos últimos anos, alguns estudos têm se voltado para o desenvolvimento e aplicação de técnicas que sejam capazes de reciclar biologicamente o P presente em efluentes e que possibilite a sua aplicação em atividades agrícolas (Pantano et al. 2016).

RECICLAGEM BIOLÓGICA DO FÓSFORO A PARTIR DO EFLUENTE

SUÍNO

A remoção do P, assim como do nitrogênio constituem importantes pontos do tratamento do ES. No entanto a retirada apenas do nitrogênio não é efetiva em termos ambientais, visto que este elemento pode ser fixado na atmosfera e oxidado em nitrito e nitrato por cianobactérias (Henrique et al. 2010). Diante disto, em termos de atenuação da eutrofização é mais efetiva a remoção do P no ES. Este processo pode ser realizado por meios químicos ou biológicos e deve garantir a redução do P em níveis mais baixos possíveis (Henrique et al. 2010; Jaafari et al. 2019).

A remoção química baseia-se no princípio de precipitação do P na forma de um sal, geralmente com ferro, alumínio ou cálcio e envolve um processo de coagulação-floculação-decantação. Este processo é dispendioso e chega a aumentar a concentração de sólidos de 20 a 40% dependendo do tipo de lodo e da forma de filtração (Pedroza et al. 2010; Bali e Gueddari, 2019; Jaafari et al. 2019). Além disto, a disponibilidade destes precipitados de P para a agricultura é discutível, uma vez que o P não se encontra em sua forma solúvel (Yeoman et al. 1988).

Já a remoção biológica é mais atraente, pois geralmente utiliza micro-organismos já presentes no lodo ativado, sendo, portanto, menos custosa que a remoção química (Wang et al. 2008; Seyedsalehi et al. 2017; Bali e Gueddari, 2019). Esta técnica baseia-se no fato de que em condições ótimas para seu crescimento e metabolismo, certas bactérias (*Acinetobacter*, *Pseudomonas*, *Aerobacter*, α - e β -proteobactérias, por exemplo) tendem a acumular P na forma de polifosfato em quantidades muito maiores do que a necessária para manter o crescimento da biomassa (Marchetto et al. 2003; Neto e Costa 2011; Srinath et al. 1959; Wang et al. 2008; Wu et al. 2009).

O processo convencional de remoção biológica de fosfato, conhecido como EBPR (Enhanced Biological Phosphate Removal) (Levin e Shapiro 1971) é complexo e inclui a ciclagem da biomassa através de ambientes aeróbios e anaeróbios.

Neste processo, o lodo microbiano é exposto a ciclos de anaerobiose e aerobiose alternados. Em condições de anaerobiose as bactérias acumuladoras de fosfato acumulam polihidroalcanoatos (PHA) e degradam os grânulos de polifosfato, liberando fosfato (Mino et al. 1998; Seyedsalehi et al. 2017; Majed e Gu 2019).

Em condições aeróbias subsequentes, a energia derivada do metabolismo de poli-b-hidroxibutirato (PHB) ou poli-b-hidroxivalerato (PHV) é usada para a acumulação de polifosfato no interior da célula (Kerrn-Jespersen e Henze, 1994; Marchetto et al., 2003). O papel de polifosfato sob condições anaeróbicas é sugerido como uma fonte de energia, tanto para o restabelecimento da força motriz de prótons, que seria consumida por transporte e o armazenamento de substrato (Comeau et al. 1986).

Como a taxa de síntese de polifosfato na etapa aeróbia é maior do que a taxa de degradação do polifosfato na etapa anaeróbia, e como somente parte da biomassa do reator aeróbio é reciclada para a etapa anaeróbia, o

resultado final do processo é a remoção de fosfato do efluente e seu acúmulo na biomassa excedente (lodo) (Forbes et al. 2009). Em linhas gerais, o processo de remoção biológica do P envolve a incorporação do elemento no interior da célula e, a subsequentemente remoção da massa enriquecida com P (Liu 1997).

O teor de P no lodo descartado de estações convencionais de tratamento de esgoto varia entre 1,5 a 2% do peso seco, enquanto que em plantas com remoção biológica de fosfato, estes teores sobem para valores entre 4 e 5% (Blackall et al. 2002). Em alguns sistemas laboratoriais foram obtidos teores de até 15% de P no peso seco do lodo descartado (Blackall et al. 2002).

Diante deste exposto, destacam-se alguns aspectos a respeito da remoção biológica de P a partir do processo EBPR. Em condições anaeróbicas o lodo ativo apresenta tendência em liberar fosfato para a fase líquida caso tenha disponibilidade de substrato orgânico que possua fácil degradação (Henrique et al. 2010). Perante essas condições, as bactérias poli-P usam a energia derivada da hidrólise dos polifosfatos para sequestrar substratos orgânicos que são armazenados na forma de polihidroalcanoatos (PHA), como PHB ou PHV. O segundo aspecto a ser destacado refere-se a energia proveniente do metabolismo dos polihidroalcanoatos. Em condições aeróbicas esta energia é utilizada no processo de acumulação de polifosfato no interior da célula (Comeau et al. 1986; Wentzel et al. 1989 apud Henrique et al. 2010; Stensel 1991 apud Henrique et al. 2010; Van Haandel e Marais 1999 apud Henrique et al. 2010).

Há também um processo alternativo, onde o acúmulo de polifosfato ocorre em reator anóxico com nitrato comoceptor final de elétrons (Villaverde 2004). A microbiologia do processo convencional de remoção de fosfato em plantas de tratamento de ES ainda não está totalmente elucidada. Estudos pioneiros indicaram organismos do gênero *Acinetobacter* como os principais responsáveis pela remoção de P em sistemas de tratamento de esgotos (Fuhs e Chen 1975). Uma série de outros organismos possivelmente responsáveis pela remoção de fosfato nas condições operacionais das plantas foram isolados em cultura pura, mas são poucos os estudos que avaliaram a importância destes isolados em escala real (Blackall et al. 2002).

Diante da complexidade de organismos que podem estar envolvidos no processo de remoção do fosfato de águas residuárias pelo processo convencional EBPR e da necessidade de caracterizar as composições das comunidades microbianas em escala real, Beer et al. (2006), por meio de análises de biomassas extraídas de plantas de lodo ativado de remoção de fosfato biológico (EBPR), observaram que pouco se conhece sobre a ecologia microbiana dos processos de EBPR e que existe a necessidade das pesquisas focarem mais nas plantas de tratamento em grande escala. Destaca-se ainda que há uma demanda para compreender o mecanismo os fatores que controlam a estabilidade do processo para reduzir o uso de substâncias químicas para este fim (Majed e Gu 2019).

Além dos processos de remoção do P por meio do EBPR, existe ainda o uso de reatores com biofilme em

leito móvel (MBBR - Moving Bed Biofilm Reactors). Esta tecnologia é baseada na utilização de biofilmes para a degradação de matéria orgânica e remoção de nutrientes presentes nos diferentes tipos de efluentes (Fujjii et al. 2011; Zhang et al. 2020). Os biofilmes são definidos como associações de células microbianas que formam comunidades aderidas sobre superfícies, bióticas ou abióticas, envolvidas numa complexa matriz extracelular composta de substâncias poliméricas e de nutrientes capturados para a formação da matriz (Menoita et al. 2012).

Em linhas gerais, este método, assim como EBPR, possui diferentes variáveis de utilização e funcionamento. Através do processo de MBBR as substâncias consideradas poluentes, como matéria orgânica e nitrogênio são substratos para o desenvolvimento da massa bacteriana cuja concentração se apresenta na forma de biofilme aderido a superfícies (Fujjii, et al. 2011; Silva et al. 2019, Bueno et al. 2019). Neste método a quantidade de substrato que pode ser removida é maior devido as altas taxas de atividades microbiológicas presentes nos biofilmes (Rusten et al. 1995).

Uma característica importante da utilização dos biofilmes é o fato deles possuírem estabilidade a variações operacionais, seja de carga, vazão, ou composição do esgoto. Desde que as comunidades de micro-organismos estejam estabelecidas no meio, elas proporcionam rusticidade ao sistema, resistindo a condições que o lodo em suspensão não seria capaz. Por isso é considerada uma tecnologia promissora para o tratamento de esgotos (Fujjii et al. 2011, Zhang et al. 2020). Além destes aspectos, destaca-se que os biofilmes podem ser implantados nos sistemas de lodos ativados convencionais já existentes, por exemplo em ampliações de estações de tratamento, com objetivo de maximizar a capacidade de remoção de matéria orgânica (Lessel 1993; Bueno et al. 2019).

O desenvolvimento e aplicação de tecnologias com o objetivo de reciclar e recuperar o P presente nos diferentes efluentes representa importantes avanços na promoção da sustentabilidade no uso deste recurso (Elser e Bennet 2011). As políticas sustentáveis, aplicadas ao uso do P, devem levar em consideração três aspectos básicos. O primeiro deles refere-se ao fato de que este nutriente é vital para todos os organismos, não possuindo outro elemento que possa substituí-lo (Ashley et al. 2011; Desmidt et al. 2015; Horta 2015). No segundo, pontua-se que as excreções animais e a erosão e lixiviação do solo representam os dois maiores fluxos de perda do P com 40% e 46% do P extraído, respectivamente (Rittmann 2011). E por último, a manutenção do fornecimento deste elemento para os diversos fins é discutível diante da finitude do recurso, onde a maior parte dos estudos aponta para um esgotamento eminente das reservas fosfáticas (Van Vuuren et al. 2010; Desmidt et al. 2015).

Baseado neste exposto, pode-se afirmar que ao realizar o descarte do ES, assim como outros efluentes com elevadas cargas de P, sem o devido tratamento são gerados desdobramentos ambientais, sociais e econômicos importantes (Barbosa e Langer 2011; Carvalho et al. 2015; Bali e Gueddari, 2019). O primeiro deles,

o mais clássico, está ligado à questão dos danos ambientais diretos que comprometem a qualidade do ambiente por meio de efeitos deletérios que afetam o bem-estar humano, animal e ecológico (Klein e Agne 2012; Costa e Soto, 2018). Em uma segunda vertente, pontua-se o fato de que o descarte do efluente com cargas de P representa a perda (desperdício) de um recurso essencial à vida e que cujas reservas minerais são limitadas, o que tange em questões relacionadas à economia e a segurança alimentar global (Ashley e al. 2011; Elser e Bennet 2011).

Portanto, é necessário que as políticas públicas estejam focadas na recuperação deste recurso por meio de tecnologias seguras e que incentive o desenvolvimento de novos métodos que sejam mais eficientes na promoção da reciclagem do P, levando sempre em consideração a finitude do mineral e a importância do mesmo para a qualidade de vida da população (Pantano et al. 2016).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar do processo de tratamento do ES por biodigestão anaeróbia possuir eficiência comprovada, este efluente ainda possui cargas de nutrientes variáveis que podem causar algum prejuízo ambiental, principalmente por eutrofização, devido a presença de P nos corpos receptores.

A reciclagem biológica do P a partir do ES é promissora no aspecto ambiental, sanitário e econômico. Entretanto, ainda existem muitos pontos a serem elucidados a respeito destas tecnologias para que novas formas de reciclagem biológica de fósforo sejam estabelecidas. Assim, caminhos devem ser abertos para que se possa gerar um produto de valor agregado a ser empregado em atividades como a agricultura, contribuindo para o prolongamento das reservas fosfáticas e a sustentabilidade ambiental da atividade suinícola.

BIBLIOGRAFIA

- Aduan, RE, Vilela, MF & Júnior Reis, FB 2004, *Os grandes ciclos bioquímicos do planeta*, Embrapa Cerrados, Planaltina, DF.
- Allen, BL & Mallarino, AP 2008, 'Effect of liquid swine manure rate, incorporation, and timing of rainfall on phosphorus loss with surface runoff', *Journal of Environmental Quality*, vol. 37, n.º 1, pp.1251-37.
- Alexandre, JR, Oliveira ML, Santos TC, Canton GC, Conceição JM, Eutrópio FJ, Cruz ZM A, Dobbss, LB & Ramos AC 2012, 'Zinco e ferro: de micronutrientes a contaminantes do solo', *Natureza on line*, vol. 10, n.º 1, pp.23-28.
- Andreazzi, MA, Santos JMG & Lazaretti RMJ 2015, 'Estudo sobre a destinação dos resíduos da suinocultura em granjas do estado do Paraná' *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, vol. 19, n.º 3, pp.744-751.
- Arruda, EM, Lana RMQ & Pereira HS 2015, 'Phosphorus extracted by mehlich and anion exchange resin in soils subjected to liming' *Bioscience Journal*, vol. 31, n.º 4, pp.1107-1117.
- Ashley, K, Cordell, D & Mavinic, D 2011, 'A brief history of phosphorus: from the philosopher's stone to nutrient recovery and reuse' *Chemosphere*, vol. 84, n.º 6, pp.737-746.
- Associação Brasileira de Proteína Animal - APBA 2020, *Relatório Anual*. São Paulo (SP): ABPA - Associação Brasileira de Proteína Animal. [http://abpa-br.org/relatorios/\(22/08/2020\)](http://abpa-br.org/relatorios/(22/08/2020)).

- Bali, M. & Gueddari, M 2019, 'Removal of phosphorus from secondary effluents using infiltration-percolation process', *Applied Water Science*, vol. 9, n.º. 54, pp. 1-8.
- Barbosa, G & Langer, M 2011, 'Uso de biodigestores em propriedades rurais: uma alternativa à sustentabilidade ambiental', *Unoesc & Ciência ACSA*, vol. 2, n.º. 1, pp.87-96.
- Beer, M, Stratton, HM, Griffiths, PC & Seviour, RJ 2006, 'Which are the polyphosphate accumulating organisms in full scale activated sludge enhanced biological phosphate removal systems in Australia?', *Journal of applied microbiology*, vol. 100, n.º. 2, pp.233-243.
- Blackall, LL, Crocetti, GR, Saunders, AM & Bond, PL 2002, 'A review and update of the microbiology of enhanced biological phosphorus removal in wastewater treatment plants', *Antonie van Leeuwenhoek*, vol. 81, pp. 681-691.
- Brasil 2014, *Sumário Mineral 2014*, Departamento Nacional de Produção Mineral, Brasília.
- Broetto, T, Tornquist, CG, Weber, EJ, Campos, BHC, Merten & CG Schneider, JC 2015, 'Indicadores geoespaciais para avaliação do impacto ambiental da suinocultura no licenciamento em âmbito municipal', *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, vol. 50, n.º. 12, pp. 1177-1185.
- Bühning GMB; Silveira, VCP 2016, 'O biogás e a produção de suínos do sul do Brasil', *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, vol. 5, n.º. 2, p.222-237.
- Bueno, RF, Campos, F, Rivera, MM, Lenis, C & Piveli, RP 2019 'Remoção simultânea de material orgânico, nitrogênio e fósforo em um reator em bateladas sequenciais com biofilme de leite móvel operado pelo processo anaeróbio-anóxico-óxico', *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, vol. 24, n.º. 4, pp.747-760.
- Busman, L, Lamb, J, Randall, G, Rehm, G & Schmitt, M 2009, 'The nature of phosphorus in soils' *Minnesota Extension Service*, University of Minnesota, Acesso em 09 novembro 2016, <<http://www.extension.umn.edu/agriculture/nutrient>>.
- Bünzen, S, Rostagno, HS, Kiefer, C, Teixeira, ADO & Ribeiro Junior, V 2012, 'Níveis de fósforo digestível para suínos em fase de crescimento', *Revista Brasileira de Zootecnia*, vol. 41, n.º. 2, pp.320-325.
- Capoane, V, Tiecher, T, Schaefer, GL, Ciotti, LH & Santos, DRD 2015, 'Transfer of nitrogen and phosphorus to surface water in a watershed with agriculture and intensive livestock production in Southern Brazil', *Ciência Rural*, vol. 45, n.º. 4, pp.647-650.
- Carvalho, BV, Souza, APM & Soto, FRM 2015, 'Avaliação de sistemas de gestão ambiental em granjas de suínos', *Revista Ambiente e Água*, vol. 10, n.º. 1, pp.164-171.
- Costa, VL, Maria, IC, Camargo AO, Grego, CR & Melo, LCA, 2014, 'Distribuição espacial de fósforo em Latossolo tratado com lodo de esgoto e adubação mineral', *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 18, n.º. 3, pp.287-293.
- Costa, AA & Soto FRM 2018, 'Tratamento do dejetos de suíno por biodigestão anaeróbia', *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, vol. 11, n.º 3, pp. 801-23.
- Comeau, Y, Hall, KJ, Hancock, REW & Oldham, WK 1986 'Biochemical model for enhanced biological phosphorus removal', *Water Research*, vol. 20, n.º. 12, pp. 1511-1521.
- Desmidt, E, Ghyselbrecht, K, Zhang, Y, Pinoy, L, Van Der Bruggen B, Verstraete W, Verstraete W & Meesschaert, B, 2015. 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.
- Domingos, JB, Longhinotti, E, Machado, VG & Nome F 2003, 'A química dos ésteres de fosfato', *Química Nova*, vol. 26, n.º. 5, pp.745-753.
- Duarte Neto, ED, Alvarenga, LH, Costa, LM, Nascimento, PH; Silveira, RZ & Leite, LHM 2010, 'Implementação e avaliação de um biodigestor de produção descontinú', *Xacta*, vol. 3, n.º. 2, pp.36-43.
- Elser, J & Bennett, E 2011, 'Phosphorus cycle: a broken biogeochemical cycle', *Nature*, vol. 478, n.º. 7367, pp.29-31.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) 2015, World fertilizer trends and outlook to 2018, Acesso 22 novembro 2016, <<http://www.fao.org/3/a-i4324e.pdf>>.
- Forbes, CM, O'leary, ND, Dobson, AD & Marchesi, JR 2009, 'The contribution of 'omic'-based approaches to the study of enhanced biological phosphorus removal microbiology', *FEMS microbiology ecology*, vol. 69, n.º. 1, pp.1-15.
- Fuhs, GW & Chen, M 1975, 'Microbiological basis of phosphate removal in the activated sludge process for the treatment of wastewater', *Microbial Ecology*, vol. 2, pp.119-138.
- Fujiji, FY, Campos, F, Piveli, RP & Sobrinho, PA 2011, 'Análise comparativa entre o processo de lodo ativado e o reator com biofilme móvel na remoção de nitrogênio de esgoto sanitário'. In: *Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Porto Alegre, 26º.
- Genova, JL, Pucci, LE & Sarubbi, J 2015, 'Estratégias para diminuir o impacto ambiental da suinocultura' *Revista Eletrônica Nutrime*, vol. 12, n.º. 1, pp.3891-3902.
- Giroto, E, Ceretta, CAU, Brunetto, G, Santos, DRDU, Silva, LSDU, Lourenzi, CR, Vieira, R CB & Schmatz, R 2010, 'Acúmulo e formas de cobre e zinco no solo após aplicações sucessivas de dejetos líquidos de suínos', *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.34, p.955965, 2010.
- Halmeman, MCR, Stachissini, MG, Damaceno, FM, Gabriel Filho, LRA, Cremasco, CP & Putti, FF 2014 'The deployment of biodigester systems in rural properties', *Brazilian Journal of Biosystems Engineering*, vol. 8, n.º.4, pp.351-360.
- Henrique, IN, Sousa, JTD, Ceballos, BSOD & Brasil, DP 2010, 'Remoção biológica de fósforo em reatores em bateladas sequenciais com diferentes tempos de retenção de sólidos', *Engenharia Sanitária e Ambiental*, vol. 15, n.º. 2, pp.197-2014.
- Horta, C 2015, 'Sustainability of phosphorus fertilisation: sources and forms of phosphate', *Revista de Ciências Agrárias*, vol. 38, n.º. 4, pp.473-483.
- Jaafari, J, Javid, AB, Barzanounic, H, Younesid, A, Amir, N, Farahanie, A, Mousazadeh, M, Soleimanie, P 2019, 'Performance of modified one-stage Phoredox reactor with hydraulic up-flow in biological removal of phosphorus from municipal wastewater', *Desalination and Water Treatment*, vol. 171, pp. 216-222.
- Kerrn-Jespersen, JP, Henze, M & Strube, R 1994, 'Biological Phosphorus Release and Uptake Under Alternating Anaerobic and Anoxic Conditions in a Fixed-film Reactor', *Water Research*, vol.28, n.º.5, pp.1253-1255.
- Klein, C.; Agne & SAA 2012, 'Fósforo: de nutriente à poluente', *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, vol. 8, n.º. 8, pp.1713-1721.
- Kleinsteuber, S 2014, 'Special Issue on "Microbial Ecology of Anaerobic Digestion"', *Bioengineering*, vol. 1, pp.111-112.
- Kunz, A, Steinmetz, RLR & Bortoli, M 2010, 'Separação sólido-líquido em efluentes da suinocultura', *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 14, n.º. 11, pp. 1220-1225.
- Lessel, TH, 1993, 'Upgrading and nitrification by submerged bio-film reactors - experiences from a large scale plant', In: *Anais da 2nd International Conference Specialize on Biofilm Reactors*, Paris, France, pp.231 - 238.
- Levin, G & Shapiro, J 1971, 'Phosphate removal process', *Environmental Science & Technology*, vol.5, pp.288-388.
- Liu, YH 1997, 'Low Sludge Carbohydrate Content: A Prerequisite for Enhanced Biological Phosphate Removal', *Water Environment Research*, vol. 69, n.º.7, pp.1290-1295.
- Loch, L, Abreu, JD, Day, B, Kloth, CG & Comper, AT 2016, 'Projeto de análise das instalações de uma granja de criação de suínos', *REA-VI-Revista Eletrônica do Alto Vale do Itajaí*, vol. 4, n.º. 6, pp.58-69.
- Majed, N, Gu, AZ 2019, 'Impact of Influent Carbon to Phosphorus Ratio on Performance and Phenotypic Dynamics in Enhanced Biological Phosphorus Removal (EBPR) System-Insights into Carbon Distribution, Intracellular Polymer Stoichiometry and Pathways Shifts', *bioRxiv*, p. 1-31.
- Marchetto, M, Campos, JR & Reali, MAP 2003, 'Remoção de fósforo de efluente de reator anaeróbio em reator com aeração intermitente seguido por flotação por ar dissolvido', *Engenharia sanitária e ambiental*, vol. 8, n.º. 1/2, pp.77-83.

- Martinez, DG, Pinheiro, FS, Kitamura, DS, Souza, SNM & Feiden, A 2015, 'Monitoring of production waste from the swine farm', *Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas*, vol. 9, n.º.3, pp.247-251.
- Medeiros, SS, Gheyi HR, Martin, A & Fernandes, D 2011, 'Características químicas do solo sob algodoeiro em área que recebeu água residuária da suinocultura', *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, vol.35, n.º. 3, p. 1047-1055.
- Menoita, E, Santos, V, Testas, C, Gomes, C & Santos, AS 2012, 'Biofilmes: conhecer a entidade', *Journal of Aging & Innovation*, vol.1 n.º.2, pp.23-32.
- Mino, T, Van Loosdrecht, M & Heijnen J 1998, 'Microbiology and biochemistry of the enhanced biological phosphate removal process', *Water Research*, vol. 32, pp.3193-3207.
- Motteran, F, Pereira, EL, & Campos, CMM 2013, 'The behaviour of na anaerobic baffled reactor (ABR) as the first stage in the biological treatment of hog farming effluents', *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, vol. 30, n.º. 2, pp. 299-310.
- Mullins, G 2009, *Phosphorus, Agriculture & The Environment*, Polytechnic Institute and State University, Virginia.
- Neto, LGL & Costa, RHR 2011, 'Tratamento de esgoto sanitário em reator híbrido em bateladas sequenciais: eficiência e estabilidade na remoção de matéria orgânica e nutrientes (N, P)', *Engenharia Sanitária e Ambiental*, vol. 16, n.º. 4, pp. 411-420.
- Nieto, VMOS, Kiefer, C2, Nascimento, KMRS, Gonçalves, LMP, Bonin, MN, Marçal, DA, Abreu, RC & Rodrigues, GP 2017, 'Níveis de fósforo digestível para suínos machos castrados dos 30 aos 50 kg', *Archivos de Zootecnia*, vol. 66, n.º. 253, pp. 23-28
- Oliveira, TC 2007, 'Fósforo: função, metabolismo e recomendações', *Revista Digital de Nutrição*, vol. 1, pp. 1-24.
- Palhães, JCP 2008, '*Licenciamento Ambiental na Suinocultura: os Casos Brasileiro e Mundial*'. Embrapa Suínos e Aves, Concórdia, SC.
- Pantano, G, Grosseli, GM, Mozeto, AA & Fadini, OS 2016, 'Sustentabilidade no uso do fósforo: uma questão de segurança hídrica e alimentar', *Química Nova*, vol. 39, n.º. 6, pp.732-740.
- Pedroza, MM, Vieira, GEG, Sousa, JF, Pickler, AC, Leal, ERM & Milhomen, CC 2010, 'Produção e tratamento de lodo de esgoto—uma revisão', *Revista Liberato*, vol. 11, n.º. 16, pp.149-160.
- Pereira, AA, Oliveira, MA, Júnior, I & Curty, I 2016, 'Custo de transporte e alocação da demanda: análise da rede logística de uma produtora brasileira de fertilizantes nitrogenados', *Journal of Transport Literature*, vol. 10, n.º.4, pp.5- 9.
- Quevedo, CMG & Paganini, WDS 2010 'Impactos das atividades humanas sobre a dinâmica do fósforo no meio ambiente e seus reflexos na saúde pública', *Ciência & Saúde Coletiva*, vol. 16, n. 8, pp. 3929-3539.
- Rittmann, BE, Mayer, B, Westerhoff, P & Edwards, M 2011, 'Capturing the lost phosphorus', *Chemosphere*, vol. 84, n.º. 6, pp.846-853.
- Rusten, B, Hem, L & Ødegaard, H 1995, 'Nitrification of municipal wastewater in moving-bed biofilm reactors', *Water Environment Research*, vol. 67, n.º. 1, pp.75-86.
- Sá, MF, Aita, C, Doneda, A, Pujol, SB, Cantú, RR, Jacques, IVC, Bastiani, GG, Oliveira, PD & Lopes PD 2014, 'Dinâmica da população de coliformes durante a compostagem automatizada de dejetos líquidos de suínos', *Arquivo Brasileira de Medicina Veterinária e Zootecnia*, vol. 66, n.º. 4, pp.1197-1206.
- Saraiva, A 2009, 'Níveis de fósforo disponível em rações para suínos de alto potencial genético para deposição de carne dos 30 aos 60 kg', *Revista Brasileira de Zootecnia*, vol. 38, n.º. 7, pp. 1279-1285.
- Schultz, G 2007, *Boas Práticas Ambientais na Suinocultura*, SEBRAE, Porto Alegre.
- Seyedsalehi, M, Jaafari, J, Hélix-Nielsen, C, Hodaifa, G, Manshour, M, Ghadimi, S, H. Hafizi, H & Barzanouni, H. 2017, 'Evaluation of moving-bed biofilm sequencing batch reactor (MBSBR) in operating A₂O process with emphasis on biological removal of nutrients existing in wastewater', *International journal of environmental science and technology*, vol. 15, n.º. 1, pp. 199-206.
- Silva, WTL, Novaes, AP, Kuroki, V, Martelli, LFA & Magnoni Júnior, L 2012, 'Avaliação físico-química de efluente gerado em biodigestor anaeróbio para fins de avaliação de eficiência e aplicação como fertilizante agrícola', *Química Nova*, vol. 35, n.º. 1, pp.35-40.
- Silva, RLA, Nascimento, JCS, Filho, LBF & Gonçalves, EAP 2019, 'Reatores biológicos em bateladas sequenciais com e sem material suporte para remoção simultânea de nitrogênio e fósforo de esgoto sanitário', *Revista de Ciências Ambientais*, vol. 12, n.º. 3, pp.51-61.
- Silva, PC & Amaral, AA 2013, 'Tratamento de dejetos de suínos com biorreator UASB', *Revista Verde de Agronegócio e Desenvolvimento Sustentável*, vol. 8, n.º. 5, pp. 141-147.
- Silva, FP, Botton, JP, Souza, SNM & Hachisuca, AMM 2015, 'Parâmetros Físico-Químicos na Operação de Biodigestores para Suinocultura', *Revista Tecnológica*, ed. esp., pp.33-41.
- Silveira, EOD & Silveira, BFB 2015, 'Uma nova agricultura para um novo ambiente', *Revista Eletrônica Ciência e Desenvolvimento*, vol.1, n.º. 1, p.2-11.
- Srinath, E, Sastry, C, Pillai, S 1959, 'Rapid removal of phosphorus from sewage by activated sludge', *Experientia*, vol.15, pp.339-340.
- Stensel, HD, Principles of biological phosphorus removal. In: Sedlak, RI (Ed.) 1991, *Phosphorus and nitrogen removal from municipal wastewater: principles and practice*. 2 nd ed., New York: Lewis Publishers, pp.141-163.
- Suárez, AG, Nielsen, K, Köhler, S, Morencio, DO & Reyes, IP 2014, 'Enhancement of anaerobic digestion of microcrystalline cellulose (MCC) using natural micronutrient sources', *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, vol. 31, n.º. 2, pp.393-401.
- U.S. Geological Survey 2019, *Mineral commodity summaries 2019*. Washington, DC: U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/70202434> (11/06/2019).
- Suh, S & Yee, S 2011, 'Phosphorus use-efficiency of agriculture and food system in the US' *Chemosphere*, vol. 84, n.º. 6, pp.806-813.
- Van Haandel, AC & Marais, GVR 1999, *O comportamento do sistema de lodo ativado: teoria e aplicação para projeto e operação*. Campina Grande: Eppgraf.
- Van Raij, B 1991, *Fertilidade do solo e adubação*. Piracicaba: Ceres; Potafos.
- Van Vuuren, DP, Bouwman, AF & Beusen, AHW 2010, 'Phosphorus demand for the 1970–2100 period: a scenario analysis of resource depletion', *Global environmental change*, vol. 20, n.º. 3, pp.428-439.
- Villaverde, S 2004, 'Recent developments on biological nutrient removal processes for wastewater treatment', *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, vol. 3, pp. 171–183.
- Wang, D, Li, X, Yang, Q, Zeng, G, Liao, D & Zhang, J 2008, 'Biological Phosphorus removal in sequencing batch reactor with single-stage oxic process', *Bioresource Technology*, vol. 99, n.º. 13, p. 5466-5473.
- Wentzel, MC, Ekama, G, Loewenthal, RE. Dold, P, & Marais, GvR.1989, 'Enhanced polyphosphate organism culture in activated sludge systems. Part II: Experimental behavior', *Water SA*, vol. 15, n.º. 2, pp.71-88.
- Wu, G, Sørensen KB, Rodgers M, Rodgers M, Zhan X 2009, 'Microbial community associated with glucose-induced enhanced biological phosphorus removal', *Water Science and Technology*, vol. 60, n.º. 8, pp.2105-2113.
- Yeoman, S, Stephenson, T, Lester, J & Perry, R 1988, 'The removal of phosphorus during waste-water treatment - a review', *Environmental Pollution*, vol. 49, pp. 183-233.
- Zardo, AO & Lima, GJMM 1999, 'Alimentos para suínos. Boletim Informativo - Pesquisa & Extensão BIPERS', vol. 8, n.º. 12.
- Zhang, X, Song, Z, Ngo, HH, Guo, W, Zhang, Z, Liu, Zhang, D, Y, Long, Z. 2020, 'Impacts of typical pharmaceuticals and personal care products on the performance and microbial community of a sponge-based moving bed biofilm reactor', *Bioresource technology*, vol. 295, pp. 1-9.