



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

CENTRO TECNOLÓGICO

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E DESENVOLVIMENTO
SUSTENTÁVEL**

THIAGO KELLER FRANCI

**ANÁLISE DAS CONDIÇÕES PARA DESENVOLVIMENTO DO MERCADO
DE ESTRUVITA RECUPERADA A PARTIR DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS NO
BRASIL**

VITÓRIA/ES

2018

THIAGO KELLER FRANCI

**ANÁLISE DAS CONDIÇÕES DE DESENVOLVIMENTO DO MERCADO DE
ESTRUVITA RECUPERADA A PARTIR DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS NO
BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável (Modalidade Profissional) da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável, área de concentração em Saneamento Ambiental e Saúde Pública.

Orientador: Prof. Dr. Ednilson Silva Felipe

VITÓRIA/ES

2018

FICHA CATALOGRÁFICA

THIAGO KELLER FRANCI

**ANÁLISE DAS CONDIÇÕES DE DESENVOLVIMENTO DO MERCADO DE
ESTRUVITA RECUPERADA A PARTIR DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS NO
BRASIL**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável (Modalidade Profissional) da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisição parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável na área de concentração em Saneamento Ambiental e Saúde Pública.

Aprovada em _____ de _____ de _____.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof^a. D.Sc Rosane Hein de Campos
Examinador Interno – PPGES/UFES

D.Sc Aureliano Nogueira da Costa
Examinador Externo - INCAPER

Prof. DSc Ednilson Silva Felipe
Orientador – PPGES/UFES

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, que me possibilitaram viver essa experiência enriquecedora;

A minha esposa Gabriella, por toda a paciência, carinho e cumplicidade;

Aos meus familiares, pelo apoio e torcida.

“Nature is on the run! Future generations will suffer ... and they will ask, What in God’s name were they doing? Didn’t they see the evidence? Didn’t they hear the warnings?”

(Al Gore).

RESUMO

A cristalização de estruvita a partir do tratamento de águas residuárias vem crescentemente sendo realizada em Estações de Tratamento de Águas Residuárias (ETARs) em muitos países, prática que vai ao encontro dos conceitos do Nexus e Economia Circular. A estruvita contém nitrogênio (N), fósforo (P) e magnésio (Mg) em sua composição, e é considerada um fertilizante reciclado valioso, especialmente devido à possibilidade de escassez futura do elemento P. Neste estudo foram avaliadas as condições de viabilidade técnica, comercial, econômica e regulamentárias para o desenvolvimento do mercado desse produto reciclado no Brasil. Os resultados indicam que existem algumas tecnologias para recuperação de estruvita sendo ofertadas no mercado mundial e que podem perfeitamente ser implementadas no país. Seu maior potencial de aceitação está na iniciativa privada, podendo a estruvita recuperada ser comercializada como um produto fertilizante refinado. O preço da estruvita no mercado mundial ainda é incerto, sendo necessária a utilização de indicadores e comparações para estimá-lo. A opção por projetos relacionados a instalação de tecnologias para recuperação de estruvita a partir do tratamento de águas residuárias passa por estudos de viabilidade econômica. O estudo de viabilidade econômica de um projeto no setor da suinocultura indica que as duas variáveis que mais impactam no resultado são o valor de mercado da estruvita e o preço da fonte de magnésio utilizada no processo. Não foram encontradas restrições legais à produção e comercialização de estruvita no Brasil, apesar de não haver registros desse produto no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Não obstante, a legislação pertinente não é clara e específica, o que gera dúvidas e incertezas em potenciais investidores.

Palavras-chave: Estruvita. Economia Circular. Nexus. Análise de Viabilidade.

ABSTRACT

The crystallization of struvite from wastewater treatment has been widely carried out in wastewater treatment plants (ETARs) in many countries, a practice that meets the concepts of the Nexus and Circular Economy. The struvite contains nitrogen (N), phosphorus (P) and magnesium (Mg) in its composition, and is considered a valuable recycled fertilizer, especially due to the possibility of future shortage of the element P. In Brazil little has been discussed regarding struvite, therefore in this study the technical, commercial, economic and regulatory feasibility conditions for the development of the market for this recycled product in the country were evaluated. The results indicate that there are already many technologies for recovery of struvite being offered in the world market. Its main differences are related to where the crystal is precipitated, the type of reactor, and the source of magnesium used. In Brazil such technologies have greater potential for acceptance in the private sector, and, due to their characteristics, the recovered struvite should be marketed as a refined fertilizer product. The price of struvite in the market is still uncertain, and it is necessary to use indicators and comparisons to estimate it. The option for accepting projects related to the installation of technologies for the recovery of struvite from wastewater treatment goes through economic feasibility studies. A developed scenario indicates that for the selected target audience, the return on investment does not occur within the time frame considered in the study, which indicates that the project is not viable and should not go forward. However, the changes in the scenario and the sensitivity analysis indicate that the two variables that most impact the result are the market value of struvite and the source and price of magnesium used in the process. There were no restrictions on the production and marketing of struvite in Brazil, although there were no records of this product in the Ministry of Agriculture, Livestock and Supply (MAPA). The relevant legislation is not clear and specific, which creates doubts and uncertainties for potential investors.

Keywords: Struvite. Circular Economy. Nexus. Feasibility Analysis.

LISTA DE SIGLAS

ACV – Avaliação de Ciclo de Vida
ANA - Agência Nacional de Águas
ANDA - Agência Nacional para Difusão de Adubos
CAPEX - Capital Expenditure
CSTR - Continuous Stirred Tank Reactor
DAP – Fosfato Diamônio
EC - Economia Circular
EoW - End-Of-Waste
EPA – Environmental Protection Agency
ESPP - European Sustainable Phosphorus Platform
FAO - Food and Agriculture Organization
FAPES - Fundação de Amparo à Pesquisa do Espírito Santo
FBR - Fluidized Bed Reactor
GEE - Gases de Efeito Estufa
HAP - Hidroxiapatita
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IWA - International Water Association
MAP - Magnesium Ammonium Phosphate (estruvita)
MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MMA - Ministério do Meio Ambiente
OPEP – Organização dos Países Exportadores de Petróleo
OPEX - Operational Expenditure
PLANSAB - Plano Nacional de Saneamento Básico
PPPs - Parcerias Público-Privadas
REACH - Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals
SAAE - Companhias de Saneamento, Autarquias Municipais
SIPEAGRO – Sistema Integrado de Produtos e Estabelecimentos Agropecuários.
SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SNSA/MCidades - Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades
TSP – Triple Superphosphate
VPL - Valor Presente Líquido

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Distribuição mundial das reservas de rocha fosfática.
- Figura 2 - O preço da rocha fosfática nos EUA ao longo dos anos (USD/t).
- Figura 3 – O aumento necessário da produção de rocha fosfática para atender a futura demanda global.
- Figura 4 - Quantidade de fósforo perdido em cada etapa do seu ciclo.
- Figura 5 - Sistema de metabolismo urbano Linear (A) e Circular (B).
- Figura 6 - Nexus água, energia e segurança alimentar.
- Figura 7 - Visualização simplificada dos elementos minerais, insumos intermediários e fertilizantes básicos dentro de uma cadeia produtiva de fertilizantes.
- Figura 8 - Comparação entre ETEs tradicionais e ETEs apoiadas no conceito de Economia Circular e Nexus.
- Figura 9 - Fontes de fósforo em efluentes líquidos.
- Figura 10 - Estimativa do crescimento da população brasileira até 2035.
- Figura 11 - Tubulação entupida devido à formação não controlada de estruvita.
- Figura 12 - O processo de formação da estruvita.
- Figura 13 - Exemplos de tecnologias existentes para recuperação de estruvita
- Figura 14 - Os maiores consumidores mundiais de fertilizantes no ano de 2010.
- Figura 15 - Origem das importações brasileiras de fosfatados.
- Figura 16 – Diferentes tamanhos de cristais de estruvita produzidos pela empresa Ostará.
- Figura 17 - Diferentes tamanhos de cristais de estruvita produzidos por diferentes empresas.
- Figura 18 – Possíveis locais de recuperação de fósforo em ETARs do tipo Lodos Ativados.
- Figura 19 – Balanço e de massa do fósforo em ETARs.
- Figura 20 - Produto berlin Pflanze®.
- Figura 21 - Fluxograma processo Ostará Pearl®
- Figura 22 - Produto Crystal Green.
- Figura 23 - O processo Phosnix no centro de clarificação oriental do lago Shinji da prefeitura de shimane, Japão.
- Figura 24 - Fluxograma do processo Phonix.

Figura 17 - Tecnologia Anphos.

Figura 26 - Fluxograma do processo Phospaqa

Figura 27 - Fluxograma do processo Nuresys.

Figura 28 - Produto comercializado BIO-STRU.

Figura 29 - Fluxograma processo Multiform Harvest.

Figura 30 - Produto comercializado pela Multiform Harvest.

Figura 31 - Cristalizador instalado em uma indústria química na cidade de Nanjing, China.

Figura 32 - Relação entre empresas desenvolvedoras de tecnologias, produtores e compradores de estruvita.

Figura 33 - População atendida por companhias estaduais, autarquias e prefeituras, e concessionárias privadas.

Figura 34 - Benefícios ocasionados pela utilização da tecnologia de recuperação de estruvita.

Figura 35 - Desenho do cristalizador proposto pela Fluir Engenharia

Figura 36 - Valor de mercado da rocha fosfática

Figura 37 - Valor de mercado DAP

Figura 38 - Estruvita ensacada em bolsas de 1m³ preparadas para o transporte.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- comparação cenário atual com cenário com 100% de coleta e tratamento de esgoto.

Gráfico 2 - Quantidade acumulada de toneladas de fósforo perdido até 2035.

Gráfico 3 - Payback cenário 1.

Gráfico 4 - Payback cenário 2

Gráfico 5 – Payback cenário 3

Gráfico 6 – Payback cenário 4

Gráfico 7 – Payback cenário 5

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Estimativa de crescimento da população brasileira até 2035.

Quadro 2 - Resumo processo Airprex

Quadro 3 - Resumo processo Ostara Pearl®.

Quadro 4 - Resumo processo Phosnix.

Quadro 5 - Resumo do processo Anphos.

Quadro 6 - Resumo processo Phospaq.

Quadro 7 - Resumo processo Nuresys.

Quadro 8 - Resumo processo Multiform Harvest.

Quadro 9 - Resumo processo Crystalactor.

Quadro 10 – Quadro resumo das características das tecnologias de recuperação de estruvita

Quadro 11 - Concentração de nutrientes em diferentes efluentes.

Quadro 12 - Comparação de fertilizantes populares com a estruvita.

Quadro 13 - Variáveis positivas e negativas para estudos de viabilidade econômicas em projetos para recuperação de nutrientes em ETARs.

Quadro 14 - Classificação de granjas de suínos por porte.

Quadro 15 - Quantidade média de suínos na granja considerado no cenário

Quadro 16 - Resumo dos itens da proposta Fluir Engenharia.

Quadro 17 - Variáveis modificadas no cenário.

Quadro 18 - Principais Leis, decretos e INs que regem o mercado de fertilizantes no país.

Quadro 19 - classificação de produtos estabelecidas na IN nº6.

Quadro 20 - Classificação para fertilizantes na IN nº6.

Quadro 21 - Regulamentos mais importantes que atualmente regem o mercado de materiais reciclados, produtos recuperados e fertilizantes na UE.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Contribuições per capita e concentrações de nitrogênio e fósforo em esgoto doméstico bruto

Tabela 2 - Concentração de nutrientes em diferentes efluentes.

Tabela 3 - Contribuição da recuperação de fósforo em ETARs por todo o mundo para a redução da mineração de fósforo.

Tabela 4 – padrões de qualidade para corpos d'água relacionados às formas de nitrogênio e fósforo Conama 357/2005.

Tabela 5 – Fluxo e concentração de fósforo (litros/per capital/ dia).

Tabela 6 - Rebanho de suínos no Brasil.

Tabela 7 - Estimativa da quantidade anual de NPK presente em resíduos de suínos.

Tabela 8 - Quantidade de nutrientes descartados por dia, mês e ano na granja.

Tabela 9 - Dados considerados no cenário 1

Tabela 10 - Payback cenário 1

Tabela 11 – Dados considerados no cenário 2

Tabela 12 - Payback cenário 2

Tabela 13 - Dados considerados no cenário 3

Tabela 14 - Payback cenário 3

Tabela 15 - Dados considerados no cenário 4

Tabela 16 - Payback cenário 4

Tabela 17 - Dados considerados no cenário 5

Tabela 18 - Payback cenário 5

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	OBJETIVOS	20
2.1	Objetivo Geral	20
2.2	Objetivos Específicos	20
3	METODOLOGIA	21
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
4.1	O pico da demanda de fósforo	23
4.2	Economia Circular	28
4.3	Nexus	30
4.4	Impactos ambientais resultantes da produção de fertilizantes agrícolas	31
4.5	A recuperação de nutrientes a partir do esgoto	34
4.6	A defasagem do saneamento no Brasil	38
4.7	A recuperação de nutrientes via precipitação de estruvita	40
4.8	Demanda de fertilizantes no Brasil e o potencial de recuperação	46
4.9	Barreiras legais para a comercialização de nutrientes reciclados a partir do tratamento de águas residuárias	48
4.10	Referências	50
5	CAPÍTULO 1 - ANÁLISE DOS ARRANJOS TECNOLÓGICOS E DAS CONDIÇÕES DE MERCADO EXISTENTES PARA A RECUPERAÇÃO DE ESTRUVITA A PARTIR DO TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS	59
5.1	O potencial de recuperação de estruvita no Brasil dentro do contexto do Nexus e Economia Circular	60
5.2	A atual legislação brasileira e as tecnologias tradicionais para remoção de nutrientes de águas residuárias	63
5.3	Condições específicas para produção de estruvita a partir do tratamento de águas residuárias	66
5.4	Tecnologias para recuperação de estruvita a partir do tratamento de águas residuárias	69

5.4.1	Processo Airprex®	74
5.4.2	Processo Ostara Pearl™	76
5.4.3	Processo Phosnix®	77
5.4.4	Processo Anphos	79
5.4.5	Processo Phospaq	80
5.4.6	Nuresys	81
5.4.7	Tecnologia Multiform	82
5.4.8	Crystalactor Process	83
5.5	Análise da atual configuração do mercado de tecnologias para recuperação e reciclagem de estruvita, e perspectivas futuras.....	88
6	CAPÍTULO 2 – ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DE PROJETOS E CONDIÇÕES COMERCIAIS PARA O DESENVOLVIMENTO DO MERCADO DE ESTRUVITA RECUPERADA A PARTIR DO TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS NO BRASIL	95
6.1	Potenciais produtores e compradores de estruvita	97
6.2	Potenciais clientes no setor privado	97
6.3	Potenciais clientes no setor público	100
6.4	Potenciais clientes para compra da estruvita	100
6.5	Ferramentas para elaboração de estudos de viabilidade econômica de projetos de implantação de tecnologias para recuperação de estruvita.....	103
6.6	Desenvolvimento de cenário	111
6.6.1	O público-alvo	111
6.6.2	Vazão de água residuária produzida	113
6.6.3	Potencial de produção de estruvita	113
6.6.4	CAPEX e OPEX.....	114
6.6.5	Receitas	117
6.7	Análise de viabilidade econômica do cenário.....	119
6.7.1	Cenário 1	120

6.7.2	Cenário 2 – Eliminação do percentual de depreciação	121
6.7.3	Cenário 3 – Variação do preço dos insumos	122
6.7.4	Cenário 4 – variação do preço da estruvita.....	123
6.7.5	Cenário 5 – Redução do CAPEX.....	124
6.8	Conclusão	125
6.9	Referências	127
7	CAPÍTULO 3 – A REGULAMENTAÇÃO RELACIONADA A RECUPERAÇÃO E COMERCIALIZAÇÃO DA ESTRUVITA NO BRASIL E EUROPA	132
7.1	Introdução	132
7.2	A regulação e regulamentação brasileira relacionada à produção de estruvita recuperada a partir do tratamento de águas residuárias.....	134
7.3	A regulamentação europeia relacionada à produção de estruvita recuperada a partir do tratamento de efluentes	140
7.4	Comparação entre os principais aspectos regulamentares no Brasil e Europa relacionados aos produtores de estruvita	148
7.5	Conclusão	150
7.6	Referências	151
8	CONCLUSÃO GERAL.....	154
9	RECOMENDAÇÕES GERAIS	156
10	ANEXOS	156
	Anexo 1 – Proposta de fornecimento de cristalizador de estruvita.	157

1 INTRODUÇÃO

O contínuo crescimento da população global pressiona a segurança energética, a segurança alimentar e a segurança hídrica em várias regiões do planeta. Para fazer face a esta realidade, ano após ano a produção agrícola têm batido recordes de crescimento impulsionada pelo desenvolvimento tecnológico do setor e pela cada vez maior utilização de fertilizantes agrícolas. Esse constante aumento na utilização de fertilizantes têm gerado preocupação em todo o mundo, principalmente devido às incertezas a respeito do nutriente fósforo (P), que, segundo Asimov (1959), é um recurso limitado não-regenerável e não substituível, e as suas reservas globais atualmente exploradas e economicamente viáveis podem ser esgotadas em poucas gerações (CHILDERS et al., 2011). De acordo com a FAO (2009), estima-se que em 2050 a população mundial atinja 9,1 bilhões, o que exigirá que a produção agrícola aumente 70% no total e quase 100% em países em desenvolvimento.

Na Europa, o fósforo foi oficialmente considerado como uma das 20 matérias-primas críticas pela Comissão Europeia em 2014 (EC, 2014), e a escassez de fosfato já é considerada uma questão econômica (SCHOLZ et al., 2014). Em um relatório de matérias-primas críticas, o fosfato foi classificado como 20º em um índice de volatilidade de preços (OAKDENE HOLLINS; FRAUNHOFER ISI, 2013 apud KLEEMANN et al. 2015). Scholz et al. (2014) acrescentam que a volatilidade dos preços do fósforo resulta de muitos fatores, incluindo "bolhas" nos mercados financeiros, desequilíbrios de oferta e demanda e efeitos geopolíticos. Segundo Cordell (2010), o papel do fósforo na produção de alimentos é indiscutivelmente o mais significativo para a sociedade, dado que cerca de 90% do fósforo utilizado globalmente é para a produção de alimentos. Ressalte-se aqui que não há substituto para o fósforo na condição de macronutriente na produção de alimentos.

A partir do entendimento de que a prevista escassez das reservas de rocha fosfática comprometerá a produção mundial de alimentos, passou-se a analisar com mais cuidado como as nações têm gerenciado o ciclo do fósforo. Nas nações mais desenvolvidas, a pouca importância histórica dada a esse elemento, considerado anteriormente abundante e de baixo custo, tem sido substituída por

investimentos em planejamento e tecnologias que possam contribuir com o fechamento do ciclo deste elemento. A recuperação e reciclagem de nutrientes a partir do tratamento de águas residuárias, como por exemplo a estruvita, tem sido uma alternativa bastante explorada em diversos países, substituindo a importação de fertilizantes fosfatados e contribuindo com o atendimento da demanda interna desse elemento. Conceitos como o de Economia Circular e Nexus têm conduzido as discussões auxiliando no desenvolvimento realmente sustentável.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar a dinâmica de funcionamento de mercado e as condições de viabilidade técnicas, econômicas, comerciais e legais para comercialização de estruvita recuperada a partir de águas residuárias no Brasil.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Objetivo específico 1:

Avaliar os arranjos tecnológicos disponíveis atualmente que permitem a recuperação de estruvita em estações de tratamento de águas residuárias, e comparar as principais tecnologias existentes e disponíveis no mercado mundial.

- Objetivo específico 2:

Discutir algumas condições comerciais para desenvolvimento do mercado de estruvita recuperada a partir do tratamento de águas residuárias no Brasil, assim como estabelecer os critérios para elaboração de estudos de viabilidade econômica de projetos voltados para a recuperação e reciclagem deste produto.

- Objetivo específico 3:

Comparar as legislações brasileira e europeia relacionadas à recuperação e comercialização de estruvita precipitada a partir do tratamento de águas residuárias, destacando os principais entraves para o desenvolvimento deste mercado.

3 METODOLOGIA

A presente pesquisa é caracterizada por sua finalidade como aplicada, pois pretende contribuir com questões de ordem prática no contexto social em que o pesquisador se insere (CRESWELL, 2007). Do ponto de vista da abordagem, essa pesquisa é caracterizada como qualitativa. Em relação ao objetivo, essa pode ser considerada uma pesquisa exploratória, pois “têm como objetivo primordial a descrição das características de determinada população ou fenômeno ou o estabelecimento de relações entre variáveis” (GIL, 2010, P.28).

Essa pesquisa teve como procedimentos a pesquisa bibliográfica e documental, sendo que a maior parte dos dados utilizados foram secundários, obtidos por meio de relatórios de pesquisa, livros acadêmicos, artigos científicos e publicações da área de saneamento, incluindo documentos e legislações de órgãos governamentais. A pesquisa documental também foi utilizada, pois foram utilizados alguns documentos “não científicos” que não receberam qualquer tratamento analítico, como: documentos oficiais, apresentações em congressos, contratos, etc.

A maior parte dos dados bibliográficos foram obtidos em bancos de dados virtuais. Os sítios acessados incluíram: ScienceDirect, Google Acadêmico, e ResearchGate. Também foram empreendidas buscas em sítios de órgãos tais como o Ministério do Meio Ambiente (MMA); da Agência Nacional de Águas (ANA); do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA); do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE); do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS).

Para conclusão do primeiro objetivo dessa pesquisa, além das fontes bibliográficas citadas anteriormente, foram utilizados bancos de dados virtuais das empresas detentoras das tecnologias discutidas na pesquisa. Por se tratar de tecnologias desenvolvidas por empresas, poucas informações estão disponíveis em livros e artigos, e, portanto, foi necessário recorrer a bancos de dados virtuais. Convém esclarecer que esse capítulo não teve como objetivo avaliar quais são as tecnologias mais indicadas para projetos de recuperação de estruivita, apenas apresentar informações para avaliação da viabilidade técnica e dos arranjos tecnológicos possíveis para esse tipo de projeto. Munido dessas informações,

espera-se que o leitor faça uma análise própria levando em consideração todas as variáveis apresentadas.

O cumprimento do segundo objetivo envolveu a coleta de dados nas fontes já citadas, e também junto a uma empresa local que contribuiu com informações a respeito de sua tecnologia patenteada. Somente assim tornou-se possível a discussão relacionada à viabilidade econômica e comercial de um projeto de recuperação de estruvita construído a partir de um cenário hipotético. A empresa forneceu dados através de uma proposta comercial, que permitiram o desenvolvimento do estudo.

O terceiro objetivo envolveu basicamente a análise de dados obtidos em artigos e documentos oficiais para avaliação da viabilidade relacionada à atual regulamentação para produção e comercialização da estruvita no Brasil e União Europeia. Convém explicar que a escolha pela União Europeia foi devido ao fato do bloco econômico estar na vanguarda das discussões a respeito do desenvolvimento de políticas públicas que permitam a comercialização da estruvita entre os estados-membros.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 O pico da demanda de fósforo

Atualmente o fósforo é considerado um insumo "estratégico" no mercado global (MAYER et al. 2016), principalmente porque diversos estudos indicam que as reservas conhecidas de fosfato se esgotarão entre 100 e 120 anos (CORDELL et al. 2009). Outras pesquisas indicam que o pico da demanda de fósforo se dará em um futuro mais distante, como por exemplo a estimativa recente do Centro Internacional de Desenvolvimento de Fertilizantes dando conta que as reservas conhecidas durarão mais 370 anos (USGS, 2011). Seja como for, von Horn e Sartorius (2009) acrescentam que a produção de fosfato se tornará mais difícil e dispendiosa muito mais cedo do que isso devido ao agravamento da acessibilidade e à crescente contaminação com substâncias como cádmio e urânio. Devido a esses fatores acredita-se que o preço da rocha fosfática poderá aumentar ainda mais devido a escassez temporária de oferta e à especulação, como foi o caso entre os anos de 2007 e 2008. Embora a oferta diminua no futuro, a demanda continuará aumentando, porque cada vez mais biomassa precisará ser produzida para alimentar a população global e satisfazer a crescente demanda de carne e energia renovável (SARTORIUS; VON HORN; TETTENBORN, 2012).

Os resultados apresentados por Cooper et al. (2011) mostram que 70% da produção global atualmente deriva de reservas que serão esgotadas dentro de 100 anos. Dessa maneira, calcula-se que o aumento da demanda resultará em um déficit de produção global significativo, que em 2070 será maior do que a produção atual. Os autores ainda destacam que a distribuição das reservas e a participação da produção atual estão concentradas em alguns de países, com destaque para Marrocos e China, conforme demonstrado na Figura 1.

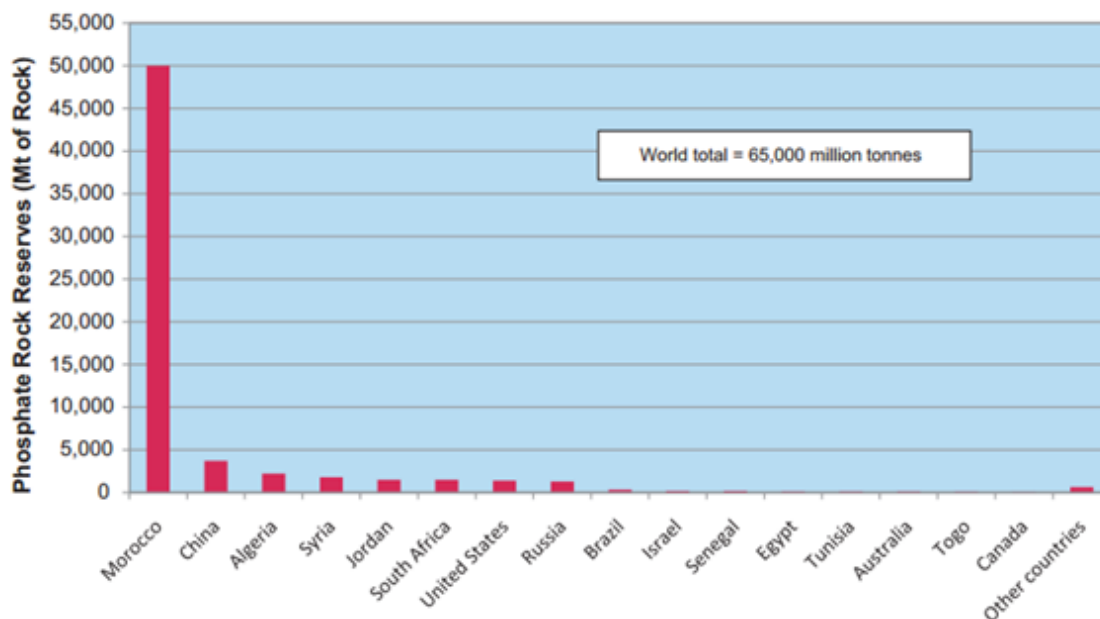


Figura 18 - Distribuição mundial das reservas de rocha fosfática.
Fonte: Cooper et al. (2011).

A concentração geográfica das reservas de fosfato pode ser comparada à das reservas de petróleo, e, neste caso, o Marrocos pode ser considerado a “Arábia Saudita do fósforo” devido à grande quantidade de reservas que controla. No entanto, com base nos números do USGS de 2011, é possível comparar o Marrocos com a OPEP, uma vez que a proporção de reservas de fosfato que possui é equivalente à proporção de reservas de petróleo de todos os 12 estados membros da OPEP combinado (BP, 2010). Historicamente os EUA foram o maior produtor de fosfato, responsável por quase um terço da produção global desde 1900. No entanto, a China ultrapassou os EUA como o maior produtor mundial de fosfato em 2006 e agora produz cerca de 37% da produção global (JASINSKI, 2011).

Em 2008 o mundo entrou em alerta devido a um princípio de crise ocasionada pelo aumento mundial do preço da rocha fosfática. O preço da rocha fosfática aumentou rapidamente em todo o mundo devido à grande demanda agrícola e pela baixa produção (Figura 2). Neste período o preço da rocha fosfática nos Estados Unidos dobrou e o preço médio nas áreas exportadoras, como o norte da África, aproximou-se de 400 euros por tonelada, o que é cinco vezes menor que o preço médio praticado em 2007 (US GEOLOGICAL SURVEY, 2009). Concomitantemente, os preços de outros nutrientes, como por exemplo o potássio, nitrogênio e enxofre, também aumentaram o que impactou diretamente nos preços

de mercado dos fertilizantes. De acordo com Nieminen (2010), desde 2008 os preços caíram, mas a crise mostrou que a escassez temporária de oferta e o aumento dos custos na produção de fertilizantes podem ocorrer a qualquer momento, e a extinção de uma rocha fosfatada de boa qualidade resultará em incerteza nos mercados.



Figura 2 - O preço da rocha fosfática nos EUA ao longo dos anos (USD/t).
Fonte: Mongabay (2010).

A natureza concentrada da produção mundial de fósforo levanta a possibilidade de que um pequeno número de países poderia ter um controle significativo sobre o preço de mercado da rocha fosfatada. Isso ocorreu com reservas de petróleo durante a crise do petróleo de 1973 quando os Estados membros árabes da OPEP impuseram um embargo de petróleo contra os EUA, fazendo com que os preços do petróleo quadruplicassem e contribuíssem para uma recessão econômica global (COOPER et al., 2011). De acordo com BP (2010), atualmente a OPEP responde por cerca de 41% da produção global de petróleo, demonstrando que a produção de fosfato é mais concentrada do que a produção de petróleo bruto, como mostra a Figura 3:

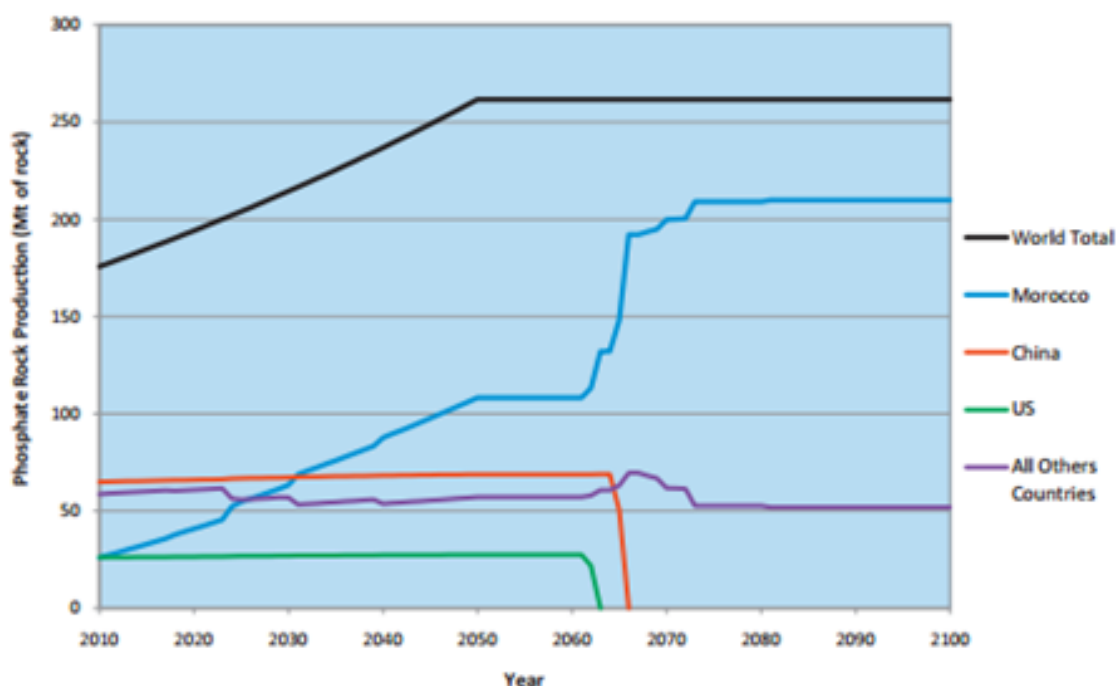


Figura 3 – O aumento necessário da produção de rocha fosfática para atender a futura demanda global.
 Fonte: Cooper et al. (2011).

Acredita-se que globalmente as reservas podem durar de 300 a 400 anos, mas a maioria dos países terá esgotado suas reservas em 100 anos, resultando em um considerável déficit de produção (COOPER et al. 2011; SCHOLZ; WELLMER, 2013). É importante observar que os dois principais produtores de fosfato do mundo atualmente, China e EUA, combinados com mais de 50% da produção mundial, terão esgotado suas reservas em cerca de 50-60 anos às taxas de extração atuais (COOPER et al., 2011). Portanto, simplesmente manter os níveis atuais de produção exigirá aumentos significativos na produção em alguns países para compensar o esgotamento em outros, alterando consideravelmente a paisagem de produção futura. Os mesmos autores citados anteriormente ainda destacam que o Marrocos, com atualmente quase 77% das reservas globais, precisará aumentar a produção em cerca de 700% até 2075, a fim de atender a maior parte desse déficit. Se este cenário for possível, Marrocos obterá uma participação muito maior na produção mundial, de cerca de 15% em 2010 para cerca de 80% até 2100, o que implica maior controle sobre os preços de mercado. Sendo assim, para a maioria dos países o objetivo é traçar estratégias para tornar-se cada vez mais eficiente no uso e na reutilização de fósforo, de modo a se tornar menos dependente do fósforo

importado e, portanto, aumentar a segurança do suprimento (ELSER; BENNETT, 2011; REIJNDERS, 2014)

Nunca é demais ressaltar que a agricultura é o principal setor de utilização de fósforo como fertilizante, com uma parcela de cerca de 90% do consumo total de fosfato” (CORDELL et al. 2009; BRUNNER, 2010; VAN VUUREN ET AL., 2010; CE, 2013 apud VOLLARO; GALIOTO; VIAGGI; 2017) Segundo a FAO (2002), as estimativas de longo prazo sugerem que a demanda de fertilizantes pode aumentar cerca de 1-1,5% ao ano até 2030, desacelerando para 0,9% ao ano entre 2030 e 2050. O aumento do uso de fertilizantes implicará aumentos na demanda de fósforo. Em 2010 a FAO estimou que a demanda de fósforo crescerá 2,9% anualmente até 2014, e cenários de longo prazo desenvolvidos por Cordell et al. (2009b) sugerem que provavelmente a demanda por fósforo crescerá 2% ao ano até 2050.

Mayer et al. (2016) destacam que além do fósforo ser um recurso crítico, geograficamente concentrado e não renovável, se mal gerenciado pode se tornar um importante poluente ambiental. Para conciliar a escassez simultânea e a superabundância desse elemento, os fluxos perdidos devem ser recuperados e reutilizados, além de serem promovidas melhorias na eficiência do seu uso. Diversos incentivos adicionais para a recuperação e reciclagem de fósforo emergem quando se contabiliza o valor total da recuperação. Além disso, a recuperação do fósforo oferece serviços valiosos para a sociedade e o meio ambiente, protegendo e melhorando a qualidade ambiental, aumentando a eficiência das instalações de tratamento de resíduos e melhorando a segurança alimentar e a equidade social.

Nesse contexto, muitos países têm se empenhado para encontrar maneiras de recuperar e reciclar o fósforo em meio urbano, na tentativa de fechar o seu ciclo e promover os benefícios já destacados. Muitos desses países desenvolveram programas que muitas vezes extrapolam suas fronteiras, sempre apoiados nos conceitos de Economia Circular e do Nexus. Estas são ferramentas orientadoras para uma melhor utilização dos recursos disponíveis, em direção ao verdadeiro desenvolvimento sustentável.

4.2 Economia Circular

Independentemente do tempo que ainda durarão as reservas globais, a atenção com o elemento fósforo tem aumentado por se tratar de um recurso finito e não substituível. O fato da concentração das reservas e produção deste elemento em poucos países, faz dele estratégico e desperta preocupação com relação ao futuro. Encontrar maneiras de reduzir a dependência da importação desta *commodity* é imprescindível, e a ação imediata mais simples a se tomar é implementar a redução do desperdício. Para tal, é importante conhecer o ciclo do fósforo em todas as suas etapas, verificando em que momento ocorrem as maiores perdas, conforme demonstrado na Figura 4.

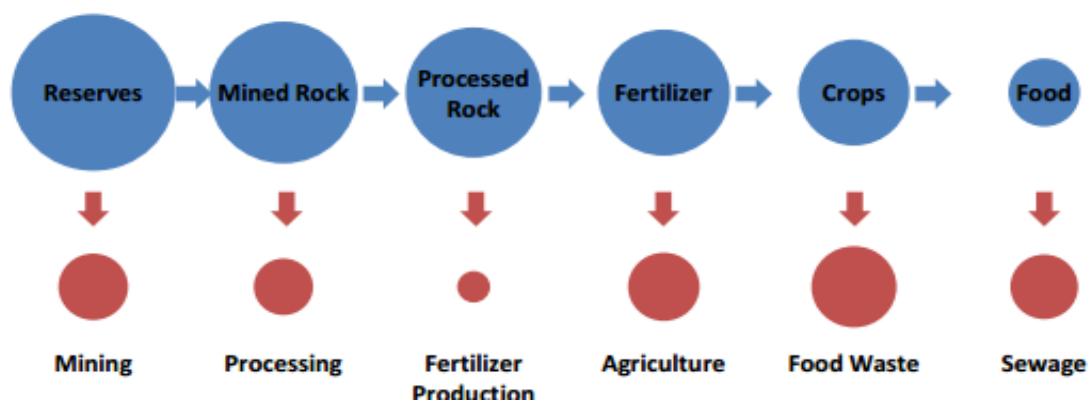


Figura 4 - Quantidade de fósforo perdido em cada etapa do seu ciclo.

Fonte: Ridden et al. (2012).

De acordo com Ridden et al. (2012), o tamanho dos círculos vermelhos na Figura 4 representam a quantidade de fosfato perdido em cada etapa do ciclo. Observa-se que as maiores perdas de fósforo estão relacionadas a mineração, agricultura, desperdício de alimentos e descarte de resíduos.

Diversos países já praticam a recuperação e reciclagem do fósforo há vários anos, destacando-se países como a Suécia, Bélgica, Holanda, Alemanha, Japão, Canadá, Austrália, etc. (VAL DEL RÍO; GÓMEZ; CORRAL, 2017; MAYER, 2013; CASTRO, 2014). Há vários anos sabe-se que o atual modelo econômico linear dos sistemas urbanos, frequentemente chamado de “extrair, transformar, descartar”, se tornou insustentável e deve ser substituído (DAIGGER, 2009; NOVOTNY, 2008). Sistemas lineares são intensivos em poluição e necessitam de cada vez mais

recursos (água, ar, terra, etc.) para diluição e assimilação de resíduos se comparados a sistemas circulares baseados em “recuperar, reutilizar e reciclar” (NOVOTNY, 2012). O modelo linear depende de grandes quantidades de materiais de baixo custo e fácil acesso e é considerado a principal razão do rápido esgotamento dos recursos naturais em todo o planeta. Neste contexto surgiu o conceito de Economia Circular (EC), uma ferramenta que alinha as ideias de desenvolvimento econômico em convergência com a sustentabilidade. De acordo com a EU (2014, anexo1, p.11 – tradução nossa), pode-se definir Economia Circular como:

[...]um conceito teórico que está principalmente preocupado com a transição da produção linear e modelo de consumo de "take-make-dispose" (extrair, transformar, descartar) para a restauração e reutilização, reparação, renovação e reciclagem de materiais e produtos existentes.

Dessa maneira, o conceito de Economia Circular pretende alcançar "melhor produção, minimizando a utilização de recursos naturais e emissão de poluentes ao mesmo tempo, e mínimo desperdício, reutilizando os resíduos da produção, reciclando e restaurando os resíduos tecnicamente inúteis" (WU et al., 2014, p. 164). O paradigma da Economia Circular sustenta continuamente a circulação de recursos e energia num sistema fechado (o planeta), reduzindo a necessidade de novas entradas de matéria-prima em sistemas de produção (GENOVESE et al., 2017). A Figura 5 resume a diferença entre a Economia Linear e Circular:

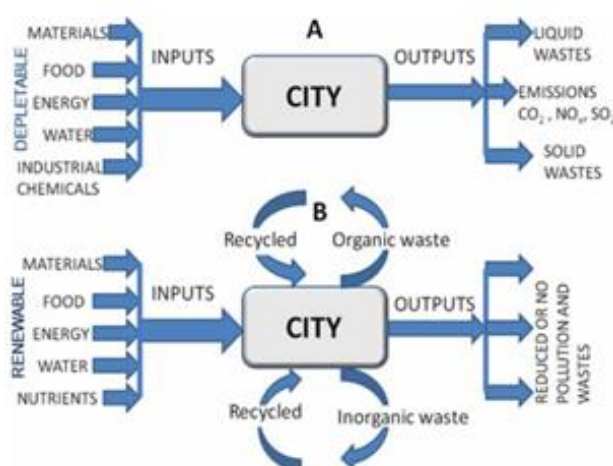


Figura 5 - Sistema de metabolismo urbano Linear (A) e Circular (B).
Fonte: Novotny (2012).

No caso do fósforo (P), Mayer et al. (2016) argumentam que o fechamento do ciclo é fundamental pois a recuperação de P pode minimizar a pobreza através de (1) redução dos custos de fertilizantes, permitindo a diminuição de despesas, (2) redução da desnutrição devido à melhoria da variedade nutricional e da segurança alimentar doméstica e (3) aumento do rendimento do mercado excedente de culturas. Os autores ainda argumentam que “os benefícios diretos em termos de segurança alimentar e diversificação das fontes de P podem tornar o P recuperado como jogador proeminente na estabilidade geopolítica” (MAYER et al., 2016, p. 6612).

4.3 Nexus

Com o intuito de facilitar a transição para uma Economia Circular, em 2011 na cidade de Bonn, Alemanha, foi realizada a primeira Conferência “The Water, Energy and Food Security Nexus – Solutions for the Green Economy” (KTH, 2015, p.1). Nesta conferência foi definido o conceito de Nexus, que, entre outras coisas, enfatiza que a política convencional e a tomada de decisões em "silos" precisam dar lugar a uma abordagem que reduza os *trade-offs* (uma escolha em detrimento de outra) e crie sinergias entre os setores. Este conceito, voltado principalmente para a relação entre os recursos água, energia e alimento, aborda externalidades entre setores e busca o alcance da eficiência global na utilização dos recursos. O Nexus reconhece que os setores de água, energia e alimentos são tão fortemente interligados que ações em uma área geralmente provocam impactos nas outras. Frequentemente esses setores operam isoladamente, e a busca por segurança em um deles pode comprometer os demais. Sendo assim, “o Nexus emergiu como um conceito útil para descrever e abordar a natureza complexa e inter-relacionada de nossos sistemas de recursos globais, dos quais dependemos para atingir diferentes objetivos sociais, econômicos e ambientais” (FAO, 2014, p. 3). Em termos práticos, o Nexus pode ser definido como uma abordagem para avaliação, desenvolvimento e implementação de políticas, que incide simultaneamente sobre a água, energia e segurança alimentar (BIZIKOVA et al., 2014). A Figura 6 apresenta resumidamente a interação entre esses elementos.

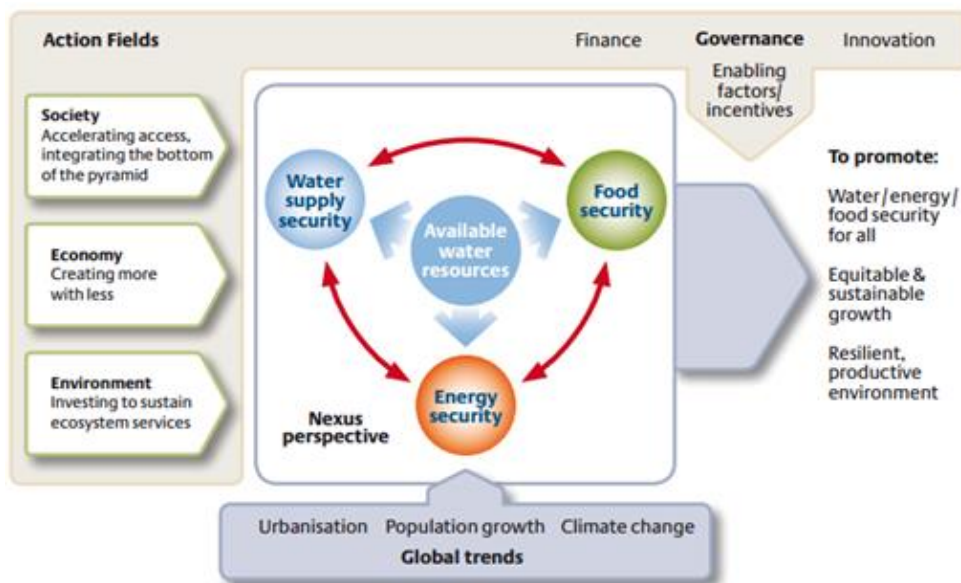


Figura 19 - Nexus água, energia e segurança alimentar.

Fonte: Hoff (2011).

Muito além de ferramentas orientadoras para uso empresarial, os conceitos de Economia Circular e Nexus têm sido aplicados no planejamento e desenvolvimento de cidades ecologicamente corretas. Tal conceito tem sido cada vez mais utilizado para o planejamento de espaços, assim como para melhoria de cidades já existentes em termos de utilização de energia e emissão de CO₂ (STOLTZ; SHAFGAT; LUNDGVIST, 2014). As Cidades do Futuro, ou Ecocidades, representam uma grande mudança de paradigma na forma como as novas cidades serão construídas ou as mais antigas serão reequipadas para alcançar uma mudança do status insustentável atual para a sustentabilidade, cumprir as metas de emissão de zero gases de efeito estufa (GEE), reutilizar e reciclar a água e recuperar recursos, incluindo nutrientes (NOVOTNY et al., 2010).

4.4 Impactos ambientais resultantes da produção de fertilizantes agrícolas

A utilização dos conceitos de Nexus no debate relacionado ao fósforo é de fundamental importância visto que a produção de fertilizantes (maior uso de P) resulta em sérios impactos ambientais. Ogasawara, Kulaif e Fernandes (2010) explicam que, no beneficiamento de rocha fosfática, a maior parte das operações é desenvolvida pela via úmida, razão pela qual se utiliza muita água no processo. Na Figura 7 é apresentada um fluxograma dessas operações. Dependendo da

disponibilidade deste recurso natural na região, esse aspecto pode implicar importantes impactos ambientais locais e regionais.

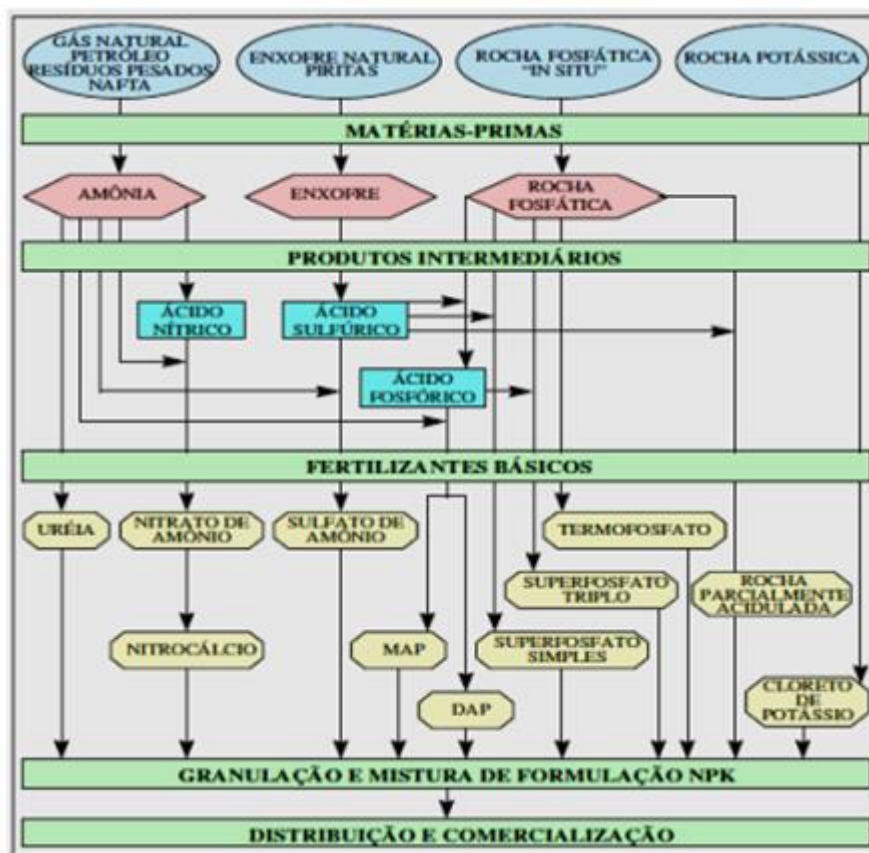


Figura 7 - Visualização simplificada dos elementos minerais, insumos intermediários e fertilizantes básicos dentro de uma cadeia produtiva de fertilizantes.

Fonte: SEAE (2011) apud Oyama (2013)

Segundo Ridder (2012), os efeitos ambientais negativos ocorrem em todas as fases do ciclo de vida da mineração, desde o desenvolvimento, extração, manuseio, beneficiamento e disposição de resíduos até o encerramento. O autor ainda acrescenta que o aumento da conscientização sobre o impacto ambiental negativo da mineração de fosfato e do processamento de fosfato está afetando a estrutura do mercado global de fosfato. De acordo com Tucci et al. (2009 apud FERNANDES; DA LUZ; CASTILHOS, 2010), os efeitos ambientais negativos desse tipo de atividade no Brasil podem ser ilustrados no projeto para produção de fertilizantes em Anitápolis, onde as atividades do projeto exigiam 777 metros cúbicos por hora, ou seja, 30% da vazão média do rio Pinheiros, cuja vazão média é de 0,629 metros cúbicos por segundo.

Outro exemplo dos impactos ambientais gerados por esse tipo de atividade é citado por Araújo et al. (2002 apud FERNANDES, DA LUZ; CASTILHOS, 2010). De acordo com os autores, em Tapira 85% da massa alimentada na usina de beneficiamento é descartada na forma de lamas, rejeitos magnéticos e rejeitos de flotação, ou seja, milhões de toneladas por ano. Esses rejeitos de lama resultantes do beneficiamento de minério fosfatado requerem soluções de tratamento em grande escala, e no Brasil a solução mais comumente adotada são “as barragens de rejeito e respectivas bacias de contenção, nas quais ocorre a sedimentação dos sólidos e a clarificação das águas, que são retomadas para utilização no processo” (FERNANDES, DA LUZ; CASTILHOS, 2010, p.114). As barragens, por falha de projeto, construção, operação ou manutenção, podem se romper, liberando quantidades gigantescas de lamas e rejeitos, que promovem grandes desastres para todos os tipos de ocupação da terra situados a jusante. O acidente da barragem da empresa Samarco em Mariana/MG ilustra bem o risco existente no gerenciamento desse tipo de barragem.

Outro problema relacionado à indústria de fertilizantes é o alto consumo de energia e emissão de gases de efeito estufa. De acordo com Sukalac (2005 apud FERNANDES, DA LUZ; CASTILHOS, 2010), o setor é responsável por 1,2% do consumo de energia e da emissão antrópica global de gases de efeito estufa, e estima-se que 92,5% sejam destinadas ao componente nitrogênio, 3% ao P_2O_5 , e 4,5% ao K_2O . Percentuais semelhantes são relacionados à emissão de gases de efeito estufa. O autor ainda acrescenta que a indústria de fertilizantes emite várias outras substâncias que impactam a saúde e o meio ambiente.

É inegável a importância dos fertilizantes fosfatados para o setor agrícola, em particular para o desenvolvimento da produção de biocombustíveis, mas é também inegável que toda sua produção (lavra, beneficiamento e industrialização) causa impactos ambientais negativos significativos (FERNANDES, DA LUZ; CASTILHOS, 2010).

O conceito de Nexus tem sido amplamente utilizado na transformação das Estações de Tratamento de Águas Residuárias (ETARs) de diversas cidades, no intuito de torná-las mais sustentáveis. Grande atenção tem sido dada às ETARs pois sabe-se que as águas residuárias possuem grandes quantidades de nutrientes

e de energia. Com planejamento, boa parte desses nutrientes que seriam descartados podem ser recuperados e reciclados para utilização como matéria prima para indústria de fertilizantes, transformando as ETARs tradicionais em ETARs sustentáveis, que poderão também gerar água para reúso e energia elétrica (ou térmica) pelo aproveitamento do biogás. Nesse contexto a utilização da abordagem Nexus se mostra fundamental, pois é importante que o planejamento seja realizado de maneira holística. A recuperação de reciclagem de nutrientes envolve a instalação de tecnologias que são consumidoras de energia, portanto a solução de um problema (recuperar nutrientes) pode causar outro, como o aumento do consumo de energia elétrica. A Figura 8 demonstra a diferença entre as ETEs tradicionais e as sustentáveis.

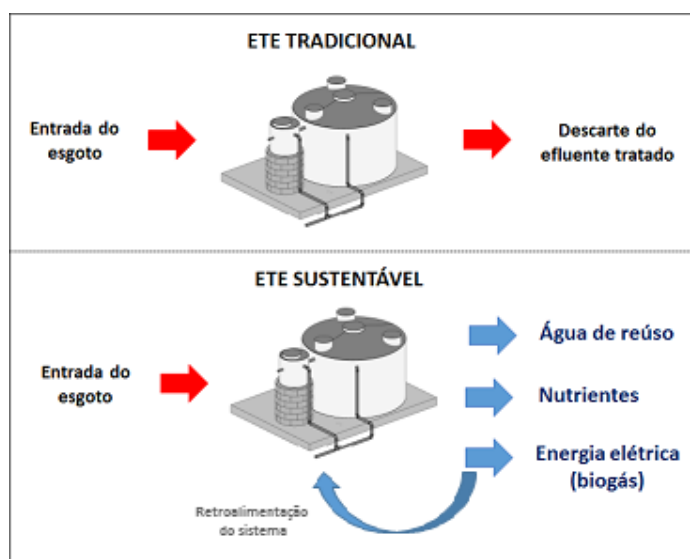


Figura 8 - Comparação entre Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) tradicionais e ETEs apoiadas no conceito de Economia Circular e Nexus.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4.5 A recuperação de nutrientes a partir do esgoto

Os problemas ambientais resultantes das etapas do processo de mineração de rocha fosfática são muitos, mas podem ser considerados relativamente pequenos se comparados aos impactos ambientais ocasionados pelo mau gerenciamento das águas residuárias e fertilizantes. De acordo com Mota e von Sperling (2009), o maior dos problemas ambientais relacionados ao uso de fertilizantes é a eutrofização. Este fenômeno é “o enriquecimento do meio aquático com nutrientes, causando o crescimento de organismos e plantas aquáticas, tanto planctônicas

quanto aderidas, que podem atingir níveis tais que sejam causadores de interferências aos usos desejáveis do corpo d'água” (MOTA; VON SPERLING, 2009, p. 32). As principais fontes de nutrientes em corpos d'água usualmente estão associadas à drenagem pluvial urbana e, principalmente, ao lançamento de esgoto. Spångberg, Tidåker, Jönsson, (2014) acrescentam que a eutrofização ameaça muitos ecossistemas costeiros ao redor do mundo.

O problema da eutrofização está relacionado principalmente aos nutrientes fósforo e nitrogênio presentes nas águas residuárias. De acordo com Mota e von Sperling (2009), no esgoto doméstico bruto as formas predominantes de nutrientes encontradas são o nitrogênio orgânico e a amônia. Já o fósforo total no esgoto doméstico apresenta-se como fosfatos na forma inorgânica (polifosfatos e ortofosfatos), provenientes principalmente de detergentes e outros produtos químicos domésticos. Os autores ainda acrescentam que as concentrações e cargas *per capita* das formas de nitrogênio e fósforo no esgoto doméstico naturalmente variam de localidade para localidade, mas, usualmente, enquadram-se dentro das faixas apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Contribuições per capita e concentrações de nitrogênio e fósforo em esgoto doméstico bruto

PARÂMETRO	CONTRIBUIÇÃO PER CAPITA (g/hab.d)	CONCENTRAÇÃO (mg/L)
Nitrogênio total	6,0 – 10,0	35 - 60
Nitrogênio orgânico	2,5 – 4,0	15 - 25
Amônia	3,5 -6,0	20 - 35
Nitrito	~0	~0
Nitrato	0,0 – 0,2	0 -1
Fósforo	0,7 – 2,0	4 – 12
Fósforo orgânico	0,2 – 0,8	1 - 5
Fósforo inorgânico	0,5 – 1,2	3 -7

Fonte: Mota e von Sperling (2009)

Segundo Tchobanoglous et al. (2003), a concentração média de fósforo em esgoto é de 4 a 16 mg/l. De acordo com Rahaman (2014), aproximadamente 34% do fósforo contidos nas águas residuárias advem de fontes humanas e de detergentes utilizados para limpeza (Figura 9).

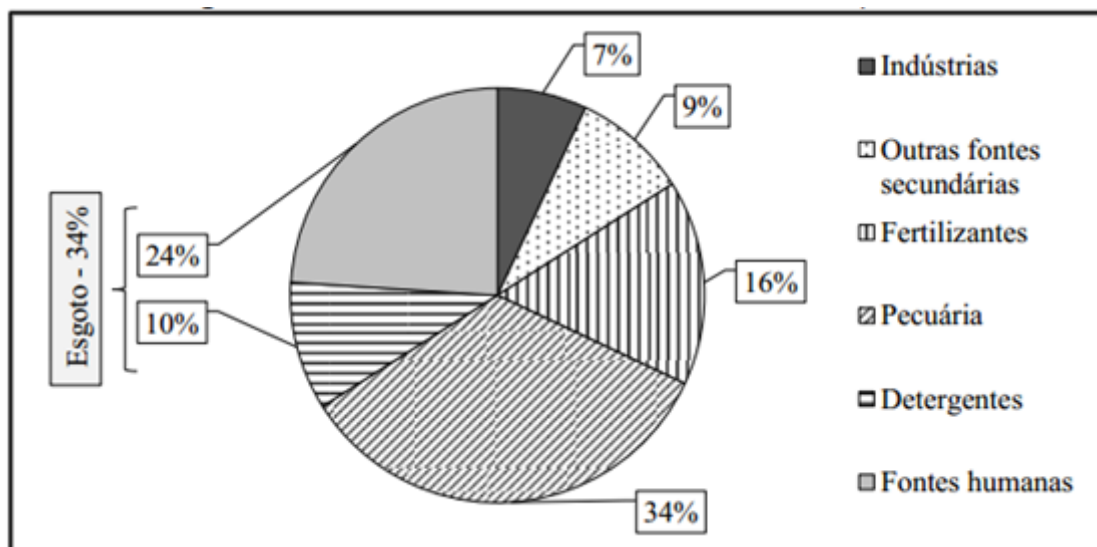


Figura 9 - Fontes de fósforo em efluentes líquidos.

Fonte: Rahaman et al. (2014).

A contribuição das atividades de pecuária como fonte de fósforo em águas residuárias é estimada em 34%, mesmo percentual referente ao esgoto doméstico. O efluente gerado por esse tipo de atividade tem como característica altas cargas de nutrientes, ainda mais se comparado ao efluente do esgoto doméstico. A Tabela 2 compara concentração de nitrogênio e fósforo em diferentes tipos de efluentes:

Tabela 2 - Concentração de nutrientes em diferentes efluentes.

Tipo de efluente	Fósforo Total (mg/L)	Nitrogênio Total (mg/L)	Fonte
Esgoto sanitário doméstico	8	47,5	Mota e von Sperling (2009)
Frigorífico bovino	71,5	71,7	Aguilar et al. (2002)
Suinocultura	636	2155	Rodrigues (2008)
Suinocultura (efluente antes do gradeamento)	850	2175	Kruger et al (1995) apud v. Münch e Barr (2001).

Percebe-se que os efluentes de origem pecuária possuem concentração muito mais elevada de nutrientes, o que os torna potencialmente mais perigosos caso o descarte seja feito sem o devido tratamento.

Por muitos anos os nutrientes nas águas residuárias foram considerados um problema de difícil solução. No entanto, com as dúvidas crescentes por todo o mundo acerca dos futuro da exploração das minas de fósforo, os nutrientes

contidos nas águas residuárias passaram a ser quantificados, e estratégias para seu aproveitamento começaram a ser desenvolvidas.

O esgoto, enfim, começa a ser visto como uma fonte de recuperação de nutrientes, podendo substituir parcialmente as importações. De acordo com Ridder et al. (2012), na União Européia as águas residuárias urbanas contêm cerca de 1,14 milhões de toneladas métricas (mmt) de P_2O_5 por ano. Isto equivale a uma parcela de 34% do fosfato importado (3,4 mmt P_2O_5) em 2011 no continente (BOYER et al., 2011). Em sua pesquisa, (MOHURD, 2016 apud ZHOU et al., 2016) levantou a informação de que no ano de 2013 havia um total de 45,1 bilhões de m^3 de águas residuárias municipais tratadas na China. A concentração total de fósforo nas ETARs chinesas variou de 4 a 9 mg / L (JIN et al., 2014). Com base no valor médio de 6,5 mg/L, o fósforo descarregado para águas residuárias somou aproximadamente 293.163 Megagramas (Mg) no ano 2013. Sendo assim, concluíram que a quantidade de P em águas residuárias municipais correspondeu a 6% do consumo de P para fertilizantes químicos no país, ou seja, 5.3 teragramas (Tg) em 2010 na China (LI et al., 2015).

Alguns países, como já destacado neste trabalho, estão na vanguarda da recuperação e reciclagem de nutrientes de águas residuárias, como, por exemplo, o Japão, onde a estruvita recuperada de ETARs já vem sendo comercializada como fertilizante em escala real desde 1998 (UENO; FUJI, 2001 apud AIDAR, 2012). Nesta mesma direção, a Suécia definiu o objetivo de que, até 2015, pelo menos 60% dos compostos de fósforo presentes nas águas residuárias seriam recuperados para uso em terras produtivas, com pelo menos metade dessa quantidade retornada para terras aráveis (TCE, 2014). Calcula-se que o teor de nutrientes, antes das perdas, na urina e nas fezes excretadas pela população sueca corresponde a 28% do nitrogênio total e 44% do fósforo total nos fertilizantes químicos vendidos na Suécia 2010/11 (STATISTICS SWEDEN, 2012^a apud SPÅNGBERG; TIDÅKER; JÖNSSON, 2014). Neste sentido, bons exemplos começam a ser vistos, como a indústria de fertilizantes ICL, uma das maiores produtoras da Europa, que se comprometeu a incluir até o ano de 2015 um percentual de 15% de fósforo reciclado entre suas matérias primas. O fósforo

reciclado pode incluir estruvita, cinzas de ossos e, se comprovadas baixos teores de impurezas, cinzas de lodo_ (HUKARI; NATTORP; KABBE, 2015).

Diversos outros estudos por todo o mundo tem sido desenvolvidos para avaliar o potencial de recuperação de nutrientes de águas residuárias. Sabe-se que tal fonte alternativa terá grande impacto ambiental, comercial e econômico, mas para que seja explorado todo o potencial de recuperação, é necessário primeiramente que a região em análise tenha altos índices de coleta e tratamento das águas residuárias. Baixos índices resultarão em pouco nutriente recuperado, altos percentuais de poluição e pouca ou nenhuma independência das importações (HUKARI; NATTORP; KABBE, 2015).

4.6 A defasagem do saneamento no Brasil

O Atlas Esgotos lançado em 2017 pela Agência Nacional das Águas (ANA) em parceria com a Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades (SNSA/MCidades) traz, entre outras coisas, o atual panorama da situação do atendimento da população brasileira com serviços de esgotamento sanitário. A Agência Nacional de Águas (ANA) é o órgão gestor de recursos hídricos, e a Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades (SNSA/MCidades) é o órgão coordenador da execução da Política Federal de Saneamento Básico. Os dois órgãos somaram esforços para ampliar o conhecimento sobre o problema por meio da análise dos sistemas de esgotamento sanitário de todas as sedes municipais do País e da proposição de ações em coleta e tratamento de esgotos. Seu foco está no desenvolvimento de estratégias que dialoguem com a busca do alcance das metas de acesso ao saneamento e melhoria da qualidade da água, estabelecidas nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável na Agenda 2030 dos Países-Membros da ONU (ANA, 2017).

Os principais resultados encontrados a respeito da situação do atendimento da população brasileira com serviços de esgotamento sanitário:

- 43% é atendida por sistema coletivo (rede coletora e estação de tratamento de esgotos);
- 12% é atendida por solução individual (fossa séptica);

- 18% da população se enquadra na situação em que os esgotos são coletados, mas não são tratados;
- 27% é desprovida de atendimento, ou seja, não há coleta nem tratamento de esgotos;
- O Plano Nacional de Saneamento Básico – PLANSAB (2014) considera como atendimento adequado de esgotamento sanitário a solução individual com fossa séptica ou os esgotos coletados e tratados de forma coletiva. Nesse conceito, 55% da população brasileira possui atendimento adequado.
- Os investimentos necessários para universalizar os serviços de esgotamento sanitário nas 5.570 sedes urbanas do País foram estimados em R\$ 150 bilhões, tendo como horizonte o ano de 2035 (Figura 10).
- As redes coletoras de esgotos alcançam 61,4% da população urbana brasileira, restando 65,1 milhões de pessoas nas cidades do País que não dispõem de sistema coletivo para afastamento dos esgotos sanitários. Nem todo esgoto coletado é conduzido a uma estação de tratamento.
- A parcela atendida com coleta e tratamento dos esgotos representa 42,6% da população urbana total. Desse modo, 96,7 milhões de pessoas não dispõem de tratamento coletivo de esgotos.

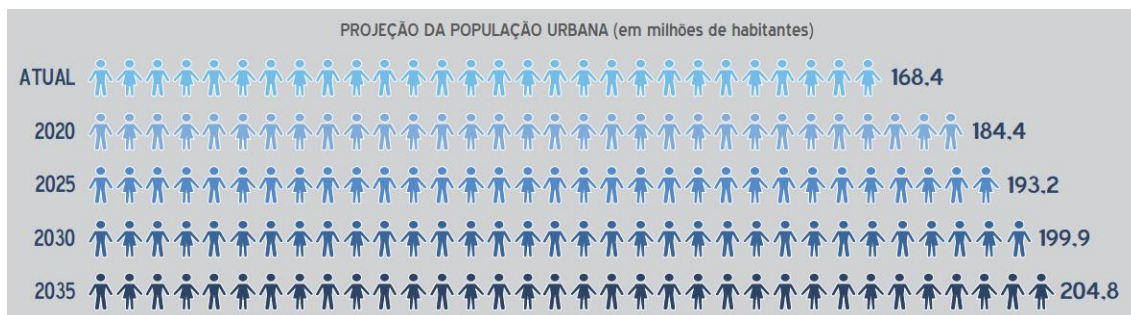


Figura 10 - Estimativa do crescimento da população brasileira até 2035.
Fonte: ANA, 2017.

Os resultados apresentados deixam claro que no Brasil o saneamento básico não foi prioridade nas ações governamentais até hoje. Tais dados evidenciam que atualmente não existe a possibilidade de se –iniciar uma política nacional de recuperação e reciclagem de nutrientes a partir do tratamento de esgoto, visto que os percentuais de coleta e tratamento ainda são muito baixos. Apenas iniciativas

isoladas são possíveis, e, dessa forma, o impacto gerado por essa fonte de nutrientes será muito pequena.

4.7 A recuperação de nutrientes via precipitação de estruvita

Atualmente somos efetivamente dependentes do fósforo extraído das minas de rocha fosfática, no entanto o aumento das preocupações ambientais, econômicas, geopolíticas tem resultado em uma ampla discussão a respeito da forma como as nações gerenciam o fósforo e a humanidade produz seus alimentos.

De acordo com Mayer et al. (2016), a maneira mais simples (e antiga) de se reciclar nutrientes é aplicando o lodo proveniente das águas residuárias na terra para a agricultura. Oyama (2013) destaca que a aplicação dos excretas no solo visando a sua fertilização era uma prática comum já no século XIX. Os excretas removidos de fossas eram em grande parte os responsáveis pela manutenção da fertilidade dos solos agrícolas. Mayer et al. (2016) também acrescentam que essa prática está sujeita a regulação e, em alguns casos, restrições com base em metais pesados e micropoluentes. No entanto, Sartorius, von Horn, Tettenbor (2012) afirmam que a crescente conscientização sobre questões ambientais impedirá que o lodo de esgoto seja utilizado na agricultura em um número crescente de países em um futuro próximo. Devido às crescentes preocupações com poluentes como metais pesados contaminantes orgânicos e patógenos, tal prática tem sido cada vez mais questionada pelo público e pelas autoridades, e alguns países europeus proibiram a aplicação de lodo de esgoto na agricultura (por exemplo, Suíça) (SCHOUMANS et al., 2015) .

Mayer et al. (2016) ainda acrescentam que além da aplicação de lodo de esgoto na terra, a recuperação de nutrientes pode ser realizada através da separação e coleta de tais compostos diretamente a partir das águas residuárias. Hoje, a maioria dos processos de separação de fósforo das águas residuárias acontecem pela precipitação e cristalização para recuperar minerais de fosfato que podem ser usados pela indústria de fertilizantes como, por exemplo, a hidroxiapatita (HAP- $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$) ou estruvita (MAP - $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) (ZHOU et al. 2016.).

O processo de recuperação de hidroxiapatita foi desenvolvido e demonstrado, inicialmente, na Holanda na década de 1980. Contudo, o aumento do custo dos produtos químicos fez com que esse processo se tornasse muito caro, especialmente se comparado com o processo de recuperação do fósforo na forma de estruvita (PIEKEMA; GIESEN, 2001 apud METCAF; EDDY, 2016). A estruvita é cientificamente conhecida como fosfato de amônio e magnésio hexahidratado, uma substância cristalina branca e ortorrômbica, que pode ser precipitada pela adição de uma fonte de magnésio (OYAMA, 2013; CASTRO, 2014). Segundo Oyama (2013), esse composto possui baixa solubilidade em água, é altamente solúvel em soluções ácidas e altamente insolúvel em soluções alcalinas, exigindo que sua precipitação ocorra em valores de pH em torno de 9,0. A estruvita é composta por 5,7% de N, 29% de P_2O_5 e 0% de K_2O (CASTRO, 2014), e pode ser recuperada por precipitação controlada do esgoto municipal ou água residuária de qualquer procedência, lixiviados de aterros sanitários, lixo industrial, dejetos de animais e humanos (BATTISTONI et al., 1997; SCHUILING; ANRADE, 1999; ADNAN et al., 2003; FORREST et al., 2008 apud FERNANDES, LUZ; CASTILHOS, 2010).

Cristais de estruvita têm uma ocorrência em áreas de grande turbulência e em meios básicos, onde sua solubilidade diminui. Os cristais surgem mais frequentemente em meios com elevados teores de fosfato e nitrogênio, tais como paredes de tubulações e superfícies de equipamentos da digestão anaeróbia e processos de pós-digestão (OHLINGER; YOUNG; SCHROEDER, 1998 apud CASTRO, 2014). Conforme demonstrado na Figura 11, a estruvita é considerada um sério problema para os operadores de ETARs pois sua formação natural e não controlada resulta em um acúmulo dentro de tubulações, bombas e centrífugas. Sua formação reduz os diâmetros dos tubos e aumenta a energia necessária para bombeamento. Quando as tubulações e bombas já estão afetadas, a remoção da estruvita aumenta significativamente o esforço de manutenção e, conseqüentemente, o custo (DOYLE E PARSONS, 2002 apud KLEEMANN et al., 2015). Os métodos para remover a estruvita formada são geralmente demorados, trabalhosos e dispendiosos, sendo em muitos casos a substituição de toda a tubulação entupida a única solução (FATTAH, 2012).

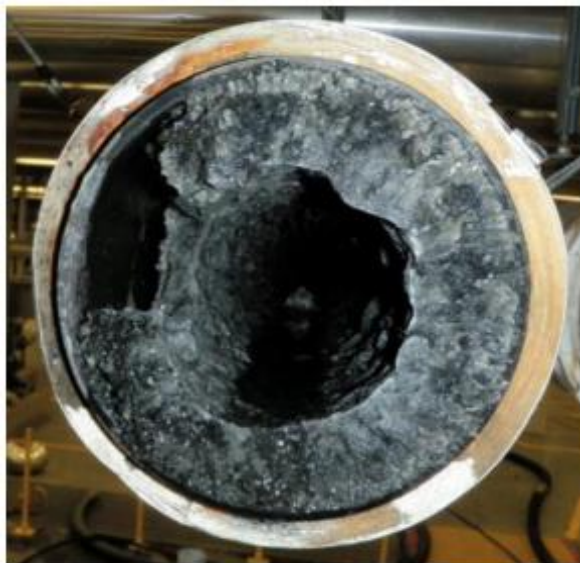


Figura 11 - Tubulação entupida devido à formação não controlada de estruvita.
Fonte: Fattah (2015).

Embora cause problemas em determinadas circunstâncias, a estruvita produzida em um processo secundário tem o potencial de ser economicamente benéfica para plantas de tratamento de águas residuárias, pois os custos de manutenção diminuem e uma receita extra pode ser gerada a partir da sua comercialização (FATTAH, 2012). Por exemplo, ela pode ser usada como adubo de liberação lenta com altas taxas de aplicação sem o perigo de danificar as raízes das plantas (BRIDGER et al., 1962; LUNT et al., 1964 apud VOLLARO; GALIOTO; VIAGGI, 2017). Por ser um composto insolúvel em água natural, são evitados problemas de eutrofização e infiltração nas águas subterrâneas, representando, portanto, outra vantagem em sua utilização como fertilizante. Portanto, a recuperação de nutrientes como estruvita pode ser vista como um processo básico para alcançar o desenvolvimento sustentável.

Cornel e Schaum (2009) também acrescentam que a precipitação de estruvita é uma alternativa simples, sem riscos potenciais à saúde e que satisfaz critérios ecológicos. A contaminação mínima, o fácil manuseio, e a facilidade de transporte e armazenamento são fatores positivos para a aplicação de estruvita como fertilizante.

Além de resultar em uma menor emissão de gases de efeito estufa, o uso de estruvita em vez de fertilizantes de fosfato ou mineral P também possui outras vantagens ambientais. Em comparação com os fertilizantes de minerais P, seu

processo de produção consome muito menos água, energia e é muito mais “limpo”. Além disso, os teores de metais pesados no produto são muito inferiores aos da maioria dos fertilizantes de P mineral (DE VRIES et al., 2017).

A estruvita têm sido largamente precipitada em todo o mundo, não somente por ser relativamente simples recuperá-la, mas também por ter em sua composição macronutrientes essenciais às plantas além do fósforo (P): o nitrogênio (N) e o magnésio (Mg). Por conter nitrogênio e fósforo em proporções definidas, apresenta elevado valor agregado, pela possível aplicação na indústria de fertilizantes, uma estratégia viável, uma vez que a demanda global por nutrientes agrícolas nitrogenados se encontra em constante crescimento (ULUDAG-DEMIRER; DEMIRER; CHEN, 2005 apud CASTRO, 2014). Os outros dois macronutrientes que compõem os cristais de estruvita também são de grande importância para o processo de fertilização agrícola. De acordo com Oyama (2013), o nitrogênio representa um dos fatores limitantes do crescimento dos vegetais e se torna, assim, um dos principais componentes dos fertilizantes utilizados na agricultura. Desempenha ainda um importante papel na constituição das moléculas de proteínas, ácidos nucleicos, vitaminas, enzimas e hormônios, elementos estes considerados vitais aos seres vivos.

De acordo com Mayer et al. (2016), a recuperação de N de águas residuárias é muitas vezes considerada uma prioridade menor do que a recuperação de P, provavelmente porque N pode ser convertido em gás N_2 prontamente removível durante o tratamento biológico. Além disso, a atmosfera fornece uma reserva pronta de N, que pode ser recuperado usando o processo Haber-Bosch. No entanto, este processo, que é usado principalmente para a produção de fertilizantes, é um processo intensivo em energia que representa aproximadamente 1% do consumo global de energia e emissões substanciais de gases de efeito estufa (GEE) (DINAR, 2011; PUCHONGKAWARIN, 2014). Assim, à medida que os custos de energia e os regulamentos de GEE aumentam, o interesse na recuperação de N crescerá, oferecendo potencial para satisfazer aproximadamente 50% do mercado global de N (BATSTONE, 2014).

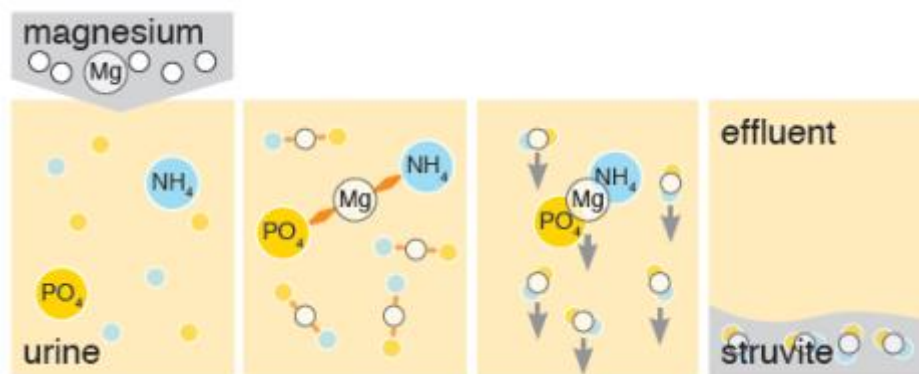


Figura 12 - O processo de formação da estruvita.

Fonte: EAWAG (2009) apud Oyama (2013).

Dos macronutrientes que compõem a estruvita, o que tem recebido maior atenção é o P devido a discussão acerca do limite de suas reservas. No entanto, Vollaro, Galioto, ViaGGi (2017) acrescentam que os custos de recuperação de fosfato via estruvita podem ser calculados a um valor mínimo de €2,00 por kg/P e podem ser superiores a €8,00 por kg/P em condições específicas (DOCKHORN, 2007; DOCKHORN, 2009 SCHAUMM, 2007 apud VOLLARO; GALIOTO; VIAGGI 2017). Ainda de acordo com os autores, a rocha fosfática nos Estados Unidos é vendida entre US\$35,00 e US\$50,00 por tonelada, dependendo da pureza. Esses valores mostram que a utilização de fósforo reciclado na forma de estruvita ainda apresenta desafios, visto que não há incentivos econômicos para se implementar tecnologias de recuperação de fósforo no setor de águas residuárias. O fato é que ainda é mais barato para a indústria de fertilizantes continuar usando rocha fosfática como matéria-prima.

A questão da recuperação do fósforo cai em uma classe de problemas para os quais a tecnologia melhorada é necessária, mas não suficiente (MAYER, 2016). Os avanços tecnológicos devem ser integrados como modelos de negócios aprimorados, compreensão em nível de sistemas, suporte a políticas e maior conscientização e aceitação pública. A implementação da reciclagem e reutilização de fósforo requer uma abordagem que envolva recuperação de valor total em escalas locais, nacionais e internacionais.

As estações de tratamento de águas residuárias em todo o mundo podem produzir anualmente três milhões de toneladas métricas (megagrama) de fósforo com tecnologias de precipitação de estruvita (CHILDERS et al. 2011; CORDELL,

DRANGERT ; WHITE, 2009; KOPPELAAR; WEIKARD 2013; DE-BASHAN; BASHAN, 2004; BRADFORD-HARTKE; LANT; LESLIE 2012; SHU ET AL., 2006 apud BIRD, 2015). Neste sentido, Shu et al. (2006) elaboraram um cenário onde 100% do fósforo seria recuperado em uma população mundial crescente. Neste cenário os autores presumiram que 100% da população estaria conectada a ETARs, e 80% do fósforo recuperado seria utilizado para produção de fertilizantes. Os resultados da quantidade de fósforo que poderia ser recuperado e da redução da mineração com relação a população mundial é apresentado na Tabela 3:

Tabela 3 - Contribuição da recuperação de fósforo em ETARs por todo o mundo para a redução da mineração de fósforo.

População (bilhões)	P₂O₅ recuperado por ano (milhões de toneladas)	% de redução na mineração
6	2,31	5,76
7	2,69	6,72
8	3,07	7,68
9	3,46	8,64
10	3,84	9,60

Fonte: Adaptado de Shu et al. (2006).

Como já discutido anteriormente, mesmo que o cenário elaborado por Shu et. al (2006) fosse possível, a quantidade de fósforo recuperada ainda não seria o suficiente para satisfazer a demanda global por este elemento. No entanto, combinada com outras medidas para recuperação e reutilização de fósforo, a cristalização de estruvita pode ajudar a criar um futuro mais sustentável e contribuir com o ciclo do fósforo. O melhoramento das tecnologias para recuperação de estruvita tem papel fundamental para a sustentabilidade do fósforo a nível planetário.

Por todo o planeta diversas empresas desenvolveram e patentearam ou ainda estão em fase de desenvolvimento e testes de tecnologias para recuperação de P de diversas fontes. Cada vez mais têm-se calculados os benefícios diretos e indiretos advindos da utilização desse tipo de tecnologia, tornando a recuperação e reciclagem do fósforo um negócio extremamente promissor dentro dos princípios da Economia Circular. Na Figura 13 encontram-se relacionadas algumas tecnologias já existentes para recuperação da estruvita a partir do tratamento de águas residuárias.

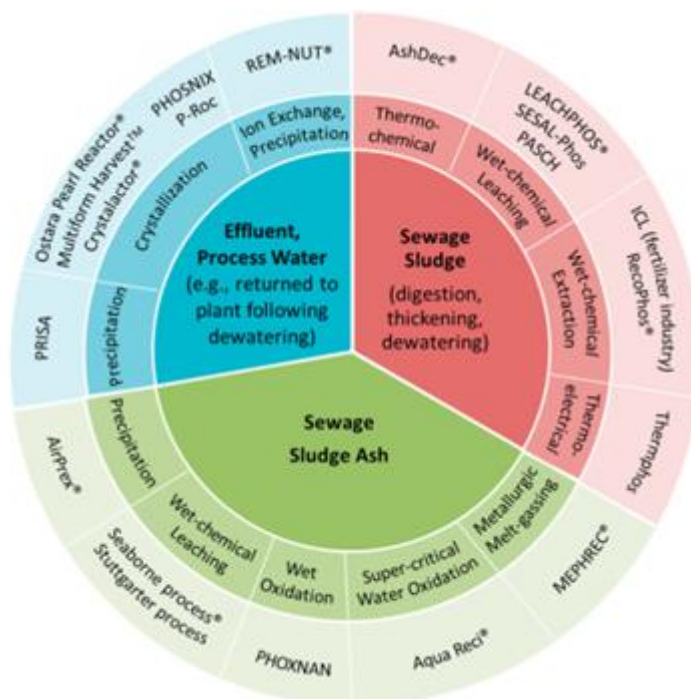


Figura 13- Exemplos de tecnologias existentes para recuperação de estruvita
Fonte: Mayer (2016)

4.8 Demanda de fertilizantes no Brasil e o potencial de recuperação

De acordo com Lupinacci (2012), o Brasil é considerado o quarto maior consumidor de fertilizantes do mundo, tendo só no ano de 2010 consumido 5,9% do total produzido mundialmente, ficando atrás somente da China, da Índia e dos Estados Unidos, com respectivos consumos de 29,8%, 16,3% e 11,8% (Figura 14).

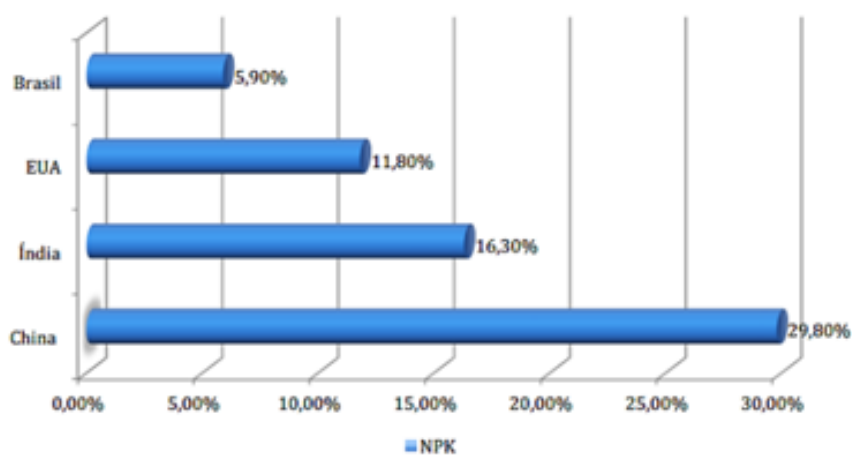


Figura 14 - Os maiores consumidores mundiais de fertilizantes no ano de 2010.
Fonte: Lupinacci (2012)

Observa-se que é necessária uma grande quantidade de fertilizantes para manutenção da safra agrícola no país, e parte é suprida pela produção interna. No entanto a quantidade de fertilizantes agrícolas produzidos internamente ainda é insuficiente para assegurar ao Brasil a autossuficiência, tendo o país que importar aproximadamente 70% dos fertilizantes que utiliza (OYAMA, 2013) (Figura 15).

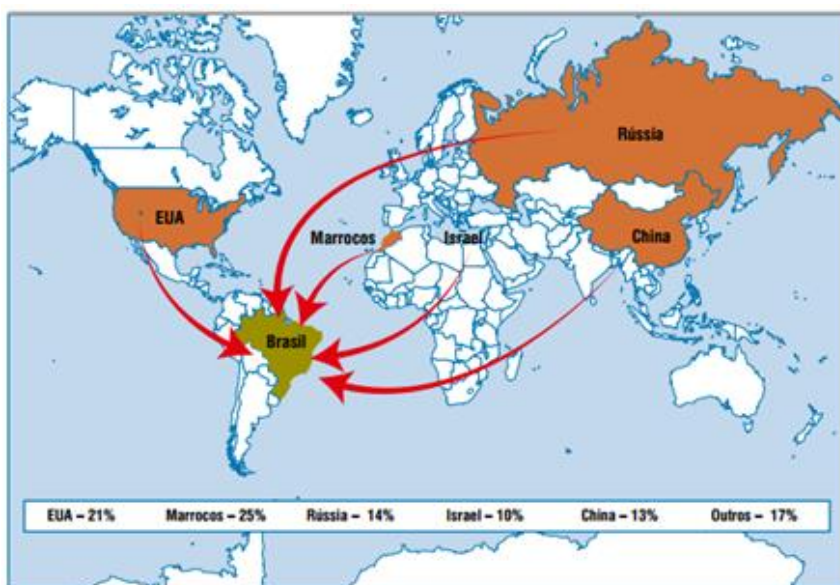


Figura 15- Origem das importações brasileiras de fosfatos.

Fonte: SECEX/MDIC/DNPM (2012) apud IBRAM (2012).

No ano de 2017 o percentual de importações foi ainda maior (aproximadamente 74%), conforme estudo realizado pela Agência Nacional para Difusão de Adubos (ANDA). De acordo com Oyama (2013), dentre os nutrientes utilizados como insumos para produção de fertilizantes, atualmente o fósforo é o insumo menos dependente das importações. Não obstante, é encontrado com pouca qualidade na lavra, visto que a rocha fosfática brasileira é ígnea e necessita ser beneficiada para a extração do elemento. No caso do potássio, por exemplo, as importações chegam a atingir cerca de 90%.

Segundo Inácio (2013), na tentativa de reduzir a dependência externa, o Ministério da Agricultura implementou em 2011 o Plano Nacional de Fertilizantes, com o objetivo de reduzir até 2016 a dependência das importações de fósforo de 49% para 12% e de nitrogênio de 78% para 33%. Em relação ao potássio, por falta de jazidas viáveis, a dependência deve continuar acima de 80%. No entanto esse plano não abordou o potencial de recuperação de nutrientes de águas residuárias, que podem contribuir para redução de dependência das importações. A falta de

interesse em utilizar outras fontes deve-se em grande parte à maneira como está segmentado o mercado brasileiro de fertilizantes, que hoje é controlado por três grupos multinacionais.

Ao contrário do que está ocorrendo em outros países, aparentemente falta no Brasil interesse no desenvolvimento de políticas que incentivem a recuperação de nutrientes das águas residuárias. Uma enorme quantidade de nutrientes contida nas águas residuárias em geral é descartada sem o devido tratamento em corpos d'água ou “corretamente” em aterros sanitários, sendo que grande parte poderia ser recuperada para ajudar a substituir as importações e abastecer o mercado interno. A comercialização de um produto reciclado como a estruvita enfrenta muitas dificuldades, como, por exemplo, comprovar para o mercado a qualidade do produto, vencer a desconfiança por se tratar de um produto reciclado, formular um preço competitivo, e, acima de tudo, enfrentar grandes interesses rompendo barreiras formadas por uma regulamentação desatualizada.

4.9 Barreiras legais para a comercialização de nutrientes reciclados a partir do tratamento de águas residuárias

Um fator limitante para o desenvolvimento do comércio de produtos reciclados a partir do tratamento de águas residuárias está relacionado à regulação econômica e a legislação vigente. A IWA (2016) destaca que o estado atual da legislação em muitos países ou regiões é conflitante. Por um lado, regulamentações ambientais cada vez mais rigorosas promovem a eficiência, mas por outro lado, as regulamentações bloqueiam a reciclagem. A realidade é que a maior parte da legislação existente foi desenvolvida para padrões lineares de produção e consumo. No longo prazo, as regulamentações ambientais e não ambientais terão de evoluir ainda mais para permitir uma economia circular completa, especialmente na regulação de recursos específicos como insumos em vez de resíduos (IWA, 2016).

O fósforo deve ser cada vez mais integrado nas discussões contemporâneas sobre mudanças ambientais globais e segurança alimentar. Um passo nessa direção ocorreu na Suécia, onde a Agência de Proteção Ambiental (EPA – Environmental Protection Agency) estabeleceu um objetivo nacional de reciclagem de 60% do

fosfato de águas residuárias até 2015 (incluindo a aplicação de biossólidos na terra) (EVANS, 2012). Tais políticas na Suécia foram definidas de acordo com os conceitos de Nexus, em uma ação conjunta entre o Conselho de Agricultura, Administração Nacional de Alimentos, Inspeção Nacional de Produtos Químicos, Instituto de Controle de Doenças Infecciosas, Conselho Nacional de Saúde e Bem-Estar, Instituto Nacional de Veterinária, Conselho Nacional de Políticas do Consumidor, Federação de Agricultores suecos, Organização das Águas e Resíduos, Federação de Alimentos e outros, o que ilustra a complexidade da política de recuperação de P e seus impactos em setores inter-relacionados (KVARNSTROM, 2003 apud MAYER, 2016).

A regulação constitui um fator primordial de indução à eficiência que é vital para a expansão sustentável da atividade econômica como um todo. Além disso, viabiliza a discussão das questões setoriais em bases técnicas apropriadas, com a devida fundamentação econômica, financeira e jurídica. Evita, ainda, a interferência do ciclo político-eleitoral, inclusive no tocante à garantia da implementação das diretrizes de planejamento (CNI, 2016).

Mayer et al. (2016) acreditam que a regulamentação mais atual referente ao P se concentra na proteção dos corpos hídricos para mitigar a eutrofização, enquanto que a recuperação do P e a reutilização dos resíduos são comparativamente desconsideradas. Muitos especialistas acham que as medidas políticas (ou seja, regulamentos, incentivos) são necessárias para superar os obstáculos econômicos atuais e iniciar a recuperação e reutilização de P (SARTORIUS; HORN; TETTENBORN, 2012). Os autores ainda destacam que, de maneira geral, as estruturas de governança de hoje não abordam explicitamente a gestão P a longo prazo (CORDELL, DRANGERT; WHITE, 2009; ASHLEY; CORDELL; MAVINIC, 2011). Em vez disso, o elemento P é gerenciado principalmente como um poluente com base em seu potencial para causar eutrofização. Os autores acreditam que a rotulagem ecológica pode proporcionar incentivos adicionais para a recuperação do P, uma vez que poderia incentivar o comércio e o uso de produtos derivados de águas residuárias, como a estruvita, se fossem classificados como produtos recuperados em vez de resíduos.

No Brasil, para que fertilizantes possam ser comercializados é preciso que atendam as especificações dos teores mínimos exigidos para cada nutriente pelo anexo I da Instrução Normativa nº 6 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), que dispõe sobre definições e normas sobre as especificações e as garantias, as tolerâncias, o registro, a embalagem e a rotulagem dos fertilizantes minerais destinados à agricultura.

Desde 2008, iniciativas conjuntas envolvendo diversos países para ampliar estudos, comércio e estimular a recuperação de fósforo foram implementadas, incluindo, entre outros, a Rede Sustentável de Coordenação de Fosforo (P-CN), o Conselho de Promoção de Reciclagem de Fósforo do Japão, Global TraPs (Processos Transdisciplinares para o Gerenciamento Sustentável de Fósforo), Global Iniciativa de pesquisa de fósforo e Plataforma europeia sustentável de fósforo (ULRICH; SCHNUG, 2013).

Nesse contexto, é muito importante entender quais os desafios relacionados a regulação e regulamentação dos mercados desses produtos. Desenhos regulatórios bem estruturados controlam a qualidade do serviço ou produto oferecido, proporcionam segurança aos investidores e aos consumidores. Legislações existentes devem ser atualizadas eliminando barreiras ao comércio e estimulando o desenvolvimento de uma Economia Circular.

4.10 Referências

AGUILAR, M. I.; SÁEZ, J.; LLORÉNS, M.; SOLER, A.; ORTUÑO, J. F. **Nutrient removal and sludge production in the coagulation-flocculation process.** Water Research. Murcia: v.36, p. 2910-2919, 2002.

AIDAR, F. N.; **Fatores intervenientes na cristalização da estruvita para a recuperação do fósforo de esgoto.** 2012. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Atlas esgotos:** despoluição de bacias hidrográficas. Agência Nacional de Águas, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Brasília: ANA, 2017. ISBN: 978-85-8210-050-9

ANDERSEN, M. **An introductory note on the environmental economics of the circular economy.** Sustainability Science; 2(1):133–40. 2007.

ASHLEY, K.; CORDELL, D.; MAVINIC, D. **A brief history of phosphorus:** from the philosopher's stone to nutrient recovery and reuse. Chemosphere. 84, 737-746. 2011.

ASIMOV, I. **Life's bottleneck.** The Magazine of Fantasy and 560 Science Fiction, p. 31–40. 1959.

BATSTONE, D. J.; HÜLSEN, T.; MEHTA, C. M.; KELLER, J. **Platforms for energy and nutrient recovery from domestic wastewater:** A review. Chemosphere, 140, 2-11. 2014.

BIRD, A. R. **Evaluation of the Feasibility of Struvite Precipitation from Domestic Wastewater as an Alternative Phosphorus Fertilizer Resource.** Master's Projects and Capstones. University of San Francisco. 2015.

BIZIKOVA, L.; CRAWFORD, E.; NIJNIK M.; SWART R. **Climate change adaptation planning in agriculture:** processes, experiences and lessons learned from early adapters. Mitigation and adaptation strategies for global change, 19 (4), 411-430. 2014.

BOYER, T. H.; PERSAUD, A.; BANERJEE, P.; PALOMINO, P. **Comparison of low-cost and engineered materials for phosphorus removal from organic-rich surface water.** Water Research, 45, 4803- 4814. 2011.

BP. **Statistical Review of World Energy.** 2010.

CASTRO, S. R. **Precipitação de estruvita:** recuperação de nitrogênio e fósforo utilizando fontes alternativas de reagentes. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2014.

CHILDERS, D. L.; CORMAN, J.; EDWARDS, M.; ELSER, J. J. **Sustainability challenges of phosphorus and food:** solutions from closing the human phosphorus cycle. Bioscience 61, 117–124. 2011.

CHOWDHURY, L. F. **Early detection of struvite formation in wastewater treatment plants.** Journal of Environmental Engineering and Science, 10(1):19-25. 2015.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). **Burocracia e entraves ao setor de saneamento.** Brasília, 2016.

COOPER J.; LOMBARDI R.; BOARDMAN D.; CARLIELL-MARQUET C. **The future distribution and production of global phosphate rock reserves.** Resources, Conservation and Recycling, 57 (2011) 78–86, 2011.

CORDELL, D. **The story of phosphorus:** Sustainability implications of global phosphorus scarcity for food security. Tese de Doutorado. Linköping University; 2010.

CORDELL, D.; SCHMID-NESET, T.; WHITE, S.; DRANGERT, J-O. **Year preferred future phosphorus scenarios:** a framework for meeting long-term phosphorus needs for global food demand. In: Ashley K, Mavinic D, Koch F, editors. International conference on nutrient recovery from wastewater streams. 2009b.

CORNEL, P.; SCHAUM, C. **Phosphorus recovery from wastewater:** needs, technologies and costs. Water Science and Technology, v. 59, n. 6, p. 1069-1076, 2009a.

CORDELL, D.; DRANGERT, J-O.; WHITE, S. **The story of phosphorus:** global food security and food for thought. Global environmental change, v. 19, n. 2, p. 292-305, 2009.

CORNEL, P.; SCHAUM, C. **Phosphorus recovery from wastewater:** needs, technologies and costs. Water Science & Technology, 59(6), 1069–1076. 2009.

DAIGGER, G. **Evolving Urban Water and Residuals Management Paradigms:** Water Reclamation and Reuse, Decentralization, Resource Recovery, Water Environment Research, **81**(8):809-823. 2009.

DE VRIES, S. C.; POSTMA, R.; VAN SCHOLL, L.; BLOM-ZANDSTRA, M.; VERHAGEN, A.; HARMS, I. **Economic feasibility and climate benefits of using**

struvite from the Netherlands as a phosphate (P) fertilizer in West Africa. Wageningen Research, Report WPR-673. 48 pp.; 6 fig.; 14 tab.; 55 ref. 2017.

EC. 20 Critical Raw Materials - **Major Challenge for EU Industry.** ed. European Commission. 2014.

ELSER, J.; BENNETT, E. **Phosphorus cycle:** a broken biogeochemical cycle. *Nature*, v. 478, n. 7367, p. 29, 2011.

EU, 2014. **Scoping Study to Identify Potential Circular Economy Actions, Priority Sectors, Material Flows and Value Chains.** Disponível em: <[http://www.ieep.eu/assets/1410/Circular economy scoping study](http://www.ieep.eu/assets/1410/Circular_economy_scoping_study)>. Acesso em: jan. 2016. [Online].

EVANS, T. D. **Biosolids in Europe.** Proc. 26th WEF Residuals Biosolids Conf. 2012.

FAO. **World agriculture:** towards 2015/2030. Summary report. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations; 2002.

FAO. **The Water–Energy–Food Nexus:** A New Approach in Support of Food Security and Sustainable Agriculture. 2014. Disponível em: <<http://www.fao.org/energy/41459-08c8c5bb39e0d89e17fdb63314c4c6ce5.pdf>> Acesso em: dez. 2016. [Online].

FATTAH, K. P. **Assessing Struvite Formation Potential at Wastewater Treatment Plants.** *International Journal of Environmental Science and Development*, Vol. 3, No. 6. 2012.

FATTAH, K. P. **Early detection of struvite formation in wastewater treatment plants.** *Journal of Environmental Engineering and Science*. 2015.

FERNANDES, F. R. C., DA LUZ, A. B., CASTILHOS, Z. C. **Agrominerais para o Brasil.** Capítulo 6. Rio de Janeiro: CETEM/MCT. 2010.

GENOVESE, A.; ACQUAYE, A.; FIGUEROA, A.; KOH, S.C. **Sustainable supply chain management and the transition towards a circular economy:** Evidence and some applications. *Omega* 66 - 344–357. 2017.

HOFF, H. **Understanding the Nexus. In: Background Paper for the Bonn 2011 Conference: The Water, Energy and Food Security Nexus.** Stockholm Environment Institute (SEI), Stockholm, Sweden. 2011.

HUKARI, S.; NATTORP, A.; KABBE, C. **PHOSPHORUS RECYCLING-NOW!** Building on Full-Scale Practical Experiences to Tap the Potential in European Municipal Wastewater. P-REX Sustainable Sewage Sludge Management Fostering Phosphorus Recovery and Energy Efficiency. European Commission no. 308645. 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (BRAM). **Informações e análises da economia mineral Brasileira • 7ª edição Fertilizantes/Fosfato/Potássio.** 2012.

INÁCIO, S. R. F. **Produção e comercialização de insumos para produção de fertilizantes: Um panorama mundial e os paradigmas do Brasil.** Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Piracicaba, 2013.

INTERNATIONAL WATER ASSOCIATION (IWA). **Water Utility Pathways in a Circular Economy.** 2016. Disponível em: <www.iwa-network.org> [Online].

JASINSKI, S. M. **Phosphate Rock, Mineral Commodity Summaries.** U.S. Geological Survey; 2011.

JIN, L.; ZHANG, G.; TIAN, H. **Current state of sewage treatment in China.** Water Research. 66, 85–98. 2014.

KLEEMANN, R.; CHENOWETH, J.; CLIFT, R.; MORSE, S.; PEARCE, P.; SAROJ, D. **Evaluation of local and national effects of recovering phosphorus at wastewater treatment plants: Lessons learned from the UK.** Resources, Conservation and Recycling, 105, 347–359. 2015.

KTH, STOCKHOLM. **The application of a nexus approach in transboundary basins.** Version for review by the Task Force on the Water-Food-Energy-Ecosystems Nexus. 2015.

LI, H.; LIU, J.; LI, G.; SHEN, J.; BERGSTRÖM, L.; ZHANG, F. **Past, present, and future use of phosphorus in Chinese agriculture and its influence on phosphorus losses.** Ambio, 44, 274–285. 2015.

LUPINACCI, F. **Estudo sobre a sazonalidade nas importações de fertilizantes no Brasil e dos valores de frete na rota Santos a Araçatuba.** Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Piracicaba, 2012.

MAYER, B.; LAWRENCE, B.; TREAVOR, B.; DRECHSEL, P.; GIFFORD, M.; HANJRA, M.; PARAMESWARAN, P.; STOLTZFUS, J.; WESTERHOFF, P.; RITTMANN, B. **Total Value of Phosphorus Recovery.** Environmental Science and Technology; 50, 6606-6620. 2016.

MAYER, B. K.; GERRITY, D.; RITTMANN, B. E.; REISINGER, D.; BRANDT-WILLIAMS, S. **Innovative Strategies to Achieve Low Total Phosphorus Concentrations in High Water Flows, Critical Reviews.** Environmental Science and Technology, 43:4, 409-441. 2013.

MCDONOUGH, W.; BRAUNGART, M.; **Cradle to cradle: remaking the way we make things.** New York, NY: North Point Press. 2002.

MONGABAY. Phosphate rock price. 2010. Disponível em: <<https://news.mongabay.com/?s=Phosphate+rock+price>>. Acesso em: jan.2017. [Online].

MOTA F. S. B.; von SPERLING M. **Nutrientes de esgoto sanitário: utilização e remoção.** Rio de Janeiro: ABES, 2009. ISBN: 978-85-7022-164-3.

MUNCH, E. V.; BARR K. **Controlled struvite crystallization for removing phosphorus from anaerobic digester sidestreams.** Water Research 35: 151–159. 2001.

NOVOTNY, V. **Sustainable urban water management.** Water & Urban Development Paradigms, 19-31, CRC Press, Boca Raton, FL. 2008.

NOVOTNY, V. **Water energy nexus – towards zero pollution and GHG emissions of future (eco) cities.** Water Infrastructure for Sustainable. 2010.

NOVOTNY, V. **Water and Energy Link in the Cities of the Future – Achieving Net Zero Carbon and Pollution Emissions Footprint.** V. Lazarova, K.H. Choo, and P. Cornel - Water/Energy Interactions of Water Reuse, IWA Publishing, London Chapter 3. 2012.

OYAMA, C. **Nutrientes da urina humana como fertilizante agrícola: análise de viabilidade econômica sobre um modelo de produção baseado na Economia Solidária e na Agricultura Familiar.** Dissertação de mestrado. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. São Paulo. 2013.

PINTO, A. C. A. **Emprego de lagoas seriadas após reatores RAC-UASB para tratamento de águas residuárias de suinocultura.** Tese de doutorado. Escola de Veterinária da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Belo Horizonte, 2012.

PUCHONGKAWARIN, C.; GOMEZ-MONT, C.; STUCKEY, D. C.; CHACHUAT, B. **Optimization-based methodology for the development of wastewater facilities for energy and nutrient recovery.** Chemosphere, 140, 150-158. 2014.

RAHAMAN, M. S.; MAVINIC, D. S.; MEIKLEHAM, A. ELLIS, N. **Modeling phosphorus removal and recovery from anaerobic digester supernatant through struvite crystallization in a fluidized bed reactor.** Water Research, v. 51, 2014.

REIJNDERS, L. **Phosphorus resources, their depletion and conservation, a review.** Resources, conservation and recycling, v. 93, p. 32-49, 2014

RIDDER, M.; JONG, S.; POLCHAR, J.; LINGEMANN, S. **Risks and Opportunities in the Global Phosphate Rock Market.** *The Hague* Centre for Strategic Studies (HCSS). 2012. Rapport No 17 | 12 | 12. ISBN/EAN: 978-94-91040-69-6.

RODRIGUES, L. S. **Concepção e avaliação de sistema de tratamento com reator anaeróbio de manta de lodo (UASB) e lagoa de polimento para águas residuárias de suinocultura.** 151 f. Tese de Doutorado em Ciência Animal. Escola de Veterinária, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG. 2008.

SARTORIUS, C.; HORN, J. VON; TETTENBORN, F. **Phosphorus recovery from wastewater. Expert survey on present use and future potential.** Water Environmental Research; 84, 313-323. 2012.

SCHOLZ, R. W.; ROY, A. H.; HELLUMS, D. T. **Sustainable phosphorus management: a transdisciplinary challenge.** In: **Sustainable phosphorus management.** Springer Netherlands. p. 1-128. 2014.

SCHOLZ, R. W.; WELLMER, F. W. **Approaching a dynamic view on the availability of mineral resources: what we may learn from the case of phosphorus?** *Global Environmental Change* 23, 11 -27, 2013.

SECRETARIA DE ACOMPANHAMENTO ECONÔMICO (SEAE). Ministério da Fazenda. **Panorama do mercado de fertilizantes.** Brasília: SEAE, 2011. 35 p.

SHU, L.; SCHNEIDER, P.; JEGATHEESAN, V., JOHNSON, J. **An economic evaluation of phosphorus recovery as struvite from digester supernatant.** *Bioresource Technology* 97, 2211–2216. 2006.

SPÅNGBERG J.; TIDÅKER P.; JÖNSSON, H. **Environmental impact of recycling nutrients in human excreta to agriculture compared with enhanced wastewater treatment.** *Science of the Total Environment* 493; 209–219. 2014.

STOLTZ, D.; SHAFQAT, O.; ARIAS, J.; LUNDQVIST, P. **On Holistic Planning in EcoCity development: Today and in the past.** *Energy Procedia*, 61, 2192-2195. 2014.

THE CHEMICAL ENGINEER (TCE). 2014. Phosphorus: time to act. Disponível em: <www.tcetoday.com>. Acesso em: set. 2017. [Online].

TCHOBANOGLIOUS, G.; BURTON, F. L.; STENSEL, H. D. **Wastewater engineering treatment and reuse.** Boston, US: McGraw-Hill Higher Education, 2003.

ULRICH, A.; SCHNUG, E. **The modern phosphorus sustainability movement: A profiling experiment.** *Sustainability*, 5, 4523-4545. 2013.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Phosphate rock.** U.S. Department of the Interior and U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, 2009.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Phosphate rock.** U.S. Department of the Interior and U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, Jan.2011.

VAL DEL RÍO, A.; GÓMEZ, J. L. C.; CORRAL, A. M. **Technologies for the Treatment and Recovery of Nutrients from Industrial Wastewater.** IGI Global, 2017.ISBN: 9781522510383.

VOLLARO, M.; GALIOTO, F.; VIAGGI, D. **The circular economy and agriculture: new opportunities for re-using Phosphorus as fertilizer.** 2017. *Bio-based and Applied Economics* 5(3): 267-285, 2016. DOI: 10.13128/BAE-18527.

VON HORN, J.; SARTORIUS, C. **Impact of supply and demand on the price development of phosphate (fertilizer).** Proceedings of the International Conference on Nutrient Recovery from Wastewater Streams. Vancouver, Canada, May 10-13, 2009.

WU, H.; SHI, Y.; XIA, Q.; ZU, W. **Effectiveness of the policy of circular economy in China: a DEA-based analysis for the period of 11th five-year-plan.** *Resources Conservation and Recycling*. 83, 163–175. 2014.

ZHOU, K.; BARJENBRUCH, M.; KABBE, C.; INIAL, G.; REMY, C. **Phosphorus recovery from municipal and fertilizerwastewater: China's potential and perspective.** *Journal of Environmental Sciences*. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jes.2016.04.010>

5 CAPÍTULO 1 - ANÁLISE DOS ARRANJOS TECNOLÓGICOS E DAS CONDIÇÕES DE MERCADO EXISTENTES PARA A RECUPERAÇÃO DE ESTRUVITA A PARTIR DO TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS

Milhares de toneladas de nutrientes que poderiam ser recuperadas e reutilizadas são descartadas diariamente no Brasil. Sabe-se, porém, que os percentuais de coleta e tratamento do esgoto no país não atingem sequer 55% da população, o que inviabiliza a recuperação e reutilização de grande parte dos nutrientes contidos no esgoto local. Os nutrientes são considerados um problema em águas residuárias principalmente devido a seu potencial de eutrofização dos corpos hídricos. Cada país possui legislação própria que define a quantidade limite de lançamento de cada nutriente, e, em razão dessas restrições, os operadores dos sistemas de tratamento de esgoto adotam as tecnologias e processos que julgam mais adequados. Em geral, esses operadores optam pela utilização de tecnologias tradicionais de remoção de nutrientes, mas a expansão de conceitos importantes, tais como os de Economia Circular e Nexus têm transformado essa realidade. Cada vez mais têm-se optado pela utilização de tecnologias que recuperam e reciclam nutrientes ao invés de simplesmente removê-los, o que contribui para o crescimento do número de Estações de Tratamento de Águas Residuárias sustentáveis. Já são muitas as tecnologias para recuperação de estruvita disponíveis no mercado internacional. Portanto, apontar suas diferenças, detalhar suas características e estabelecer critérios para escolhas são etapas fundamentais para contribuir com a tomada de decisão dos operadores de Estações de Tratamento de Águas Residuárias.

Esse capítulo tem como objetivo:

“Avaliar os arranjos tecnológicos disponíveis atualmente que permitem a recuperação de estruvita em Estações de Tratamento de Águas Residuárias, e comparar as principais tecnologias existentes e disponíveis no mercado mundial.”

O capítulo está estruturado com os seguintes tópicos:

- O potencial de recuperação de estruvita no Brasil dentro do contexto do Nexus e Economia Circular.

- A atual legislação brasileira e as tecnologias tradicionais de remoção de nutrientes em águas residuárias.
- Condições específicas para precipitação de estruvita a partir do tratamento de águas residuárias.
- Levantamento de tecnologias existentes para precipitação de estruvita a partir do tratamento de águas residuárias e a atual organização deste mercado.
- Análise da atual configuração do mercado de tecnologias para recuperação e reciclagem de estruvita, e perspectivas futuras.

Este capítulo pretende contribuir com uma análise do atual ciclo do fósforo no Brasil e do potencial de recuperação deste elemento a partir do tratamento de águas residuárias. Concomitantemente, pretende demonstrar as condições necessárias para que projetos relacionados à recuperação de estruvita sejam viáveis tecnicamente, a partir do detalhamento das condições de formação da estruvita em águas residuárias, do levantamento de possíveis arranjos tecnológicos, e da comparação entre tecnologias já existentes e disponíveis no mercado mundial.

5.1 O potencial de recuperação de estruvita no Brasil dentro do contexto do Nexus e Economia Circular

O documento Atlas Esgotos, elaborado pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2017), órgão gestor dos recursos hídricos no Brasil, em conjunto com a Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades (SNSA/MCidades), levantou informações a respeito do percentual de cobertura do atendimento dos serviços de coleta e tratamento de esgoto, assim como realizou projeções de investimentos necessários para que o país alcance a universalização do atendimento.

O documento concluiu que atualmente apenas 43% da população possuem acesso a coleta e tratamento de esgoto (sistema coletivo), e 12% da população possuem soluções individuais. De maneira resumida, conclui-se que atualmente apenas 55% da população possuem atendimento adequado. Por isso, a ANA (2017) estima os

investimentos necessários para universalizar os serviços de esgotamento sanitário em todo o País em R\$ 150 bilhões até o ano de 2035 (ANA, 2017).

Sabe-se que não se pratica a recuperação de nutrientes a partir do tratamento de águas residuárias no Brasil (ao menos em grande escala) e, portanto, conclui-se que toneladas de nutrientes que poderiam ser reciclados e comercializados são descartadas em aterros sanitários ou em corpos d'água.

O Atlas Esgotos utiliza informações do IBGE para estimar a população urbana brasileira até o ano de 2035. A estimativa está detalhada no Quadro 1:

HOJE	2020	2025	2030	2035
168.400.000	184.400.000	193.200.000	199.900.000	204.800.000

Quadro 1 – Estimativa de crescimento da população urbana brasileira até 2035.

Fonte: Adaptado de ANA (2017).

Ao se considerar que a concentração média de fósforo por litro no esgoto sanitário é de 8 mg/L (MOTA; VON SPERLING, 2009), e que um ser humano produz em média 200 litros por dia de esgoto, é possível concluir que cada pessoa descarta 1,6 gramas de fósforo por dia nas águas residuárias. Considerando o potencial médio de recuperação de fósforo do efluente de 55% (MONTAG, 2008), conclui-se que, mesmo com o baixo percentual de coleta e tratamento de esgoto praticado atualmente (43% referente aos sistemas coletivos, onde a economia de escala justifica a instalação de tecnologias de recuperação de nutrientes), o Brasil desperdiça anualmente cerca de 24 mil toneladas de fósforo. Construindo-se um cenário em que 100% da população urbana são contemplados com serviços de coleta e tratamento de esgoto em sistemas coletivos, calcula-se que o país estaria desperdiçando aproximadamente 54 mil toneladas de fósforo por ano por não reciclar este nutriente (Gráfico 1).

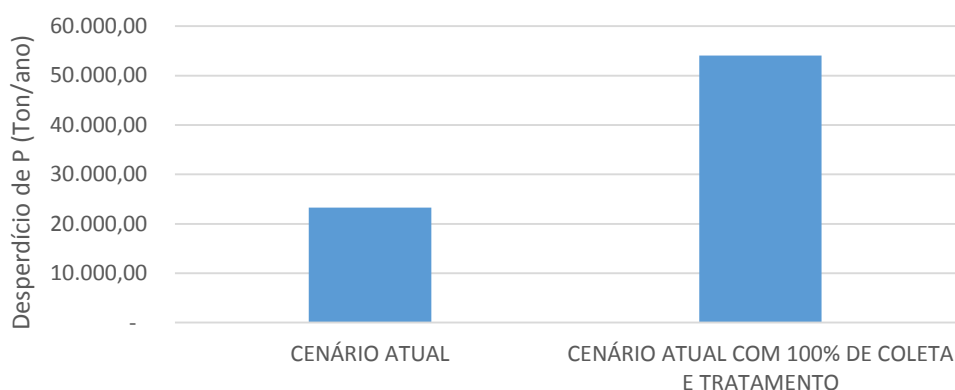


Gráfico 1 - Comparação cenário atual com cenário com 100% de coleta e tratamento de esgoto.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Construindo outro cenário em que se considera o aumento populacional urbano até 2035 e a universalização do serviço de esgotamento sanitário, calcula-se que ao fim do período o país terá desperdiçado aproximadamente 1 milhão e cem mil toneladas (Gráfico 2):

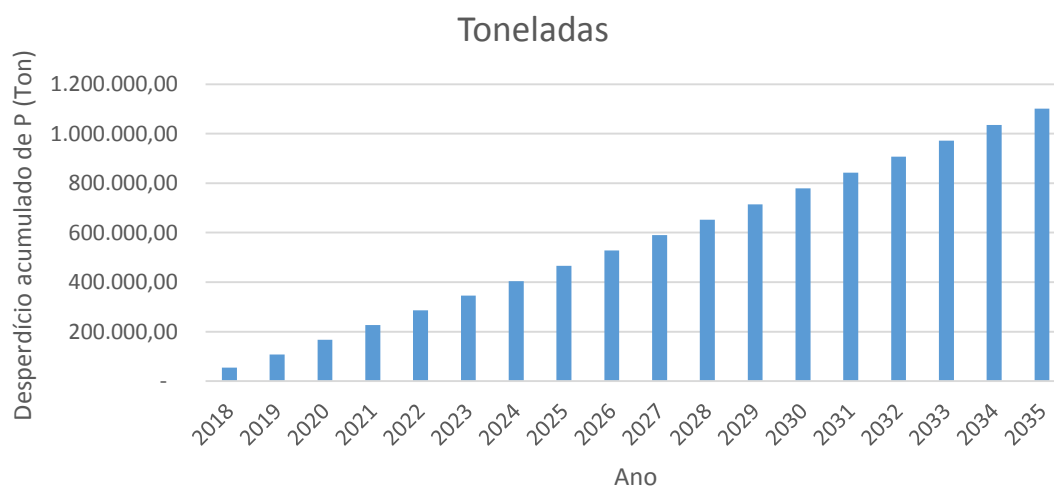


Gráfico 2 - Quantidade acumulada de toneladas de fósforo perdido até 2035.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Este cenário elaborado deixa claro que o potencial de recuperação de fósforo em águas residuárias no país é enorme, ainda mais se levarmos em consideração que no cenário elaborado calculou-se apenas a recuperação a partir do esgoto doméstico. Diversas águas residuárias de origem industrial e agropecuária possuem quantidades de fósforo ainda maior, o que torna evidente o quão necessário é a recuperação e reutilização desse elemento.

O conceito de Economia Circular determina que a substituição dos modelos lineares de produção chamados de “extrair, transformar e descartar” por modelos circulares nos quais dedica-se a recuperar, reutilizar e reciclar (3 R's) (DAIGGER, 2009; NOVOTNY, 2012), é a tendência em países desenvolvidos, tendo os nutrientes em águas residuárias recebido grande atenção devido às preocupações crescentes acerca da escassez futura do elemento fósforo. Nas Estações de Tratamento de Águas Residuárias (ETARs), além do conceito de Economia Circular têm-se aplicado os conceitos do Nexus, que destaca a necessidade de se recuperar conjuntamente água, energia e nutrientes, analisando o desperdício desses insumos de maneira holística e transformando as ETARs em verdadeiras usinas de produção de insumos.

Para o aproveitamento dos recursos recuperados das ETARs, é necessário avaliar questões técnicas, econômicas, políticas e regulatórias. No Brasil, a função primária das ETARs é atender aos parâmetros estabelecidos na legislação de modo a evitar a poluição dos recursos hídricos. O atendimento aos parâmetros estabelecidos nem sempre é tarefa simples, e faz-se uso de técnicas e tecnologias comumente utilizadas para esse fim. No entanto, tais técnicas limitam-se a remover os nutrientes, o que não está de acordo com os princípios da Economia Circular e Nexus. Para a recuperação dos nutrientes é necessário a utilização de tecnologias que tenham como objetivo a precipitação controlada no formato de estruvita, por exemplo.

5.2 A atual legislação brasileira e as tecnologias tradicionais para remoção de nutrientes de águas residuárias

Os países possuem legislação própria para o lançamento de esgoto e proteção dos corpos d'água, definindo, entre outras coisas, os limites para lançamento de nutrientes. No Brasil, a legislação é definida nas Resoluções CONAMA 357, de 17 de março de 2005, e CONAMA 430, de 13 de maio de 2011, que complementa e altera a primeira (BRASIL, 2011).

Além dos padrões de qualidade dos corpos receptores, as Resoluções apresentam ainda padrões para o lançamento de efluentes nos corpos d'água (padrões de descarga ou de emissão). O real objetivo de ambos é a preservação da qualidade

no corpo d'água. Na Tabela 4 encontram-se resumidos os padrões estabelecidos na Resolução Conama 357/2005 para lançamentos dos nutrientes Nitrogênio (N) e Fósforo (P) nos corpos d'água.

Tabela 4 – padrões de qualidade para corpos d'água relacionados às formas de nitrogênio e fósforo Conama 357/2005.

PARÂMETRO	UNIDADE	ÁGUAS DOCES			
		1	2	3	4
N amoniacal total (pH≤7,5)	mgN/L	3,7	3,7	13,3	-
N amoniacal total (7,5<pH≤8,0)	mgN/L	2,0	2,0	5,6	-
N amoniacal total (8,0<pH≤8,5)	mgN/L	1,0	1,0	2,2	-
N amoniacal total (pH≤8,5)	mgN/L	0,5	0,5	1,0	-
Nitrato	mgN/L	10,0	10,0	10,0	-
Nitrito	mgN/L	1,0	1,0	1,0	-
P total (ambiente lêntico) ^(a)	mgP/L	0,020	0,03	0,05	-
P total (ambiente intermediário ^(b) e tributário direto de ambiente lêntico)	mgP/L	0,025	0,050	0,075	-
P total (ambiente lótico e tributário direto de ambiente intermediário)	mgP/L	0,10	0,10	0,15	-

Fonte: Mota e von Sperling, (2009, p. 41)

Notas: (a) Ambiente intermediário: tempo de residência entre 2 e 40 dias; (b) Corpos d'água lênticos: lagos e represas; Corpos d'água lóticos: rios.

Além disso, o artigo 10 da Resolução Conama 357/2005 apresenta as condições específicas para os parâmetros de nitrogênio e fósforo:

Art. 10°. Os valores máximos estabelecidos para os parâmetros relacionados em cada uma das classes de enquadramento deverão ser obedecidos nas condições de vazão de referência.

[...]

§ 2° Os valores máximos admissíveis dos parâmetros relativos às formas químicas de nitrogênio e fósforo, nas condições de vazão de referência, poderão ser alterados em decorrência de condições naturais, ou quando estudos ambientais específicos, que considerem também a poluição difusa, comprovem que esses novos limites não acarretarão prejuízos para os usos previstos no enquadramento do corpo de água.

§ 3° Para águas doces de classes 1 e 2, quando o nitrogênio for fator limitante para eutrofização, nas condições estabelecidas pelo órgão ambiental competente, o valor de nitrogênio total (após oxidação) não deverá ultrapassar 1,27 mg/L para ambientes lênticos e 2,18 mg/L para ambientes lóticos, na vazão de referência (BRASIL, 2011).

Sendo assim, de acordo com a Resolução Conama 357/2005, a escolha da tecnologia a ser adotada para tratamento e remoção de nutrientes das águas residuárias, deveria: (1) atender aos padrões estabelecidos na referida resolução;

(2) verificar se os parâmetros estão de acordo com as exigências do corpo receptor; e (3) avaliar qual o uso que se fará do efluente tratado (em caso de reúso).

No caso do fósforo, a Resolução CONAMA 430/2011 atualizou a Resolução 357/2005, e seu artigo 17 estabelece que:

Art. 17. O órgão ambiental competente poderá definir padrões específicos para o parâmetro fósforo no caso de lançamento de efluentes em corpos receptores com registro histórico de floração de cianobactérias, em trechos onde ocorra a captação para abastecimento público.

As tecnologias de remoção de nutrientes implementadas nas ETARs são comumente categorizadas como (a) processos de remoção de nitrogênio, (b) processos de remoção de fósforo e (c) processos combinados de remoção de nitrogênio e fósforo (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2008). Segundo Ambulkar (2017), a remoção de nitrogênio pode ser conseguida através de métodos físico-químicos ou processos biológicos. Mota e von Sperling (2009) acrescentam que a remoção biológica de nitrogênio em sistemas de tratamento é bastante conhecida e se dá pelos processos sequenciais de nitrificação e desnitrificação.

A remoção de fósforo pode ser conseguida com precipitação química ou absorção biológica por biomassa microbiana nas plantas de tratamento (AMBULKAR, 2017). Segundo esse autor, o tratamento físico-químico pode produzir efluentes com baixas concentrações de fósforo, mas também gera maiores quantidades de lodo. Ainda de acordo com o autor, no passado a remoção de fósforo era realizada predominantemente via métodos físico-químicos, mas para evitar os altos custos envolvidos nesses processos, passou-se a investir em métodos biológicos.

Destaca-se no quesito remoção de nutrientes pelo tratamento biológico os sistemas de lodo ativado convencionais, nos quais a remoção de fósforo é parcial e ocorre através da sua incorporação no lodo (MOTA; VON SPERLING, 2009, p. 228). Segundo os autores, esses sistemas em que se conciliam etapas de tratamento anaeróbio e aeróbio, são considerados complexos, e, em geral, utilizam grandes quantidades de energia. Os autores ainda acrescentam que os sistemas naturais de tratamento de esgoto, por exemplo, lagoas de estabilização e suas variantes, em geral não são muito eficientes na remoção de nutrientes.

O tratamento biológico pode remover 20 a 30% de fósforo mesmo sem ser configurado especificamente para a remoção de fósforo (METCALF; EDDY, 2003; PARSONS; SMITH, 2008 apud NIEMINEN, 2010). O fósforo restante, que não está ligado no processo de lodo ativado, pode ser removido com precipitação química ou com remoção biológica de fósforo, o que exige configurações de ETAR específicas para tanto (METCALF; EDDY, 2003). Ainda de acordo com os autores, estes métodos podem ser combinados e utilizados simultaneamente, ou, para ter a precipitação química como *backup* para garantir a qualidade do efluente em condições variáveis. No geral, com tecnologia moderna é possível remover mais de 95% do fósforo entrante. A precipitação química permite a obtenção de efluentes com concentração de fósforo de até 0,1 mg/L (METCALF; EDDY, 2003).

5.3 Condições específicas para produção de estruvita a partir do tratamento de águas residuárias

Com a evolução das tecnologias e das técnicas de tratamento de águas residuárias, passou-se a observar que a precipitação de nutrientes de maneira controlada pode resultar em importantes benefícios econômicos e ambientais. A precipitação de estruvita, cientificamente conhecida como fosfato de amônio e magnésio hexahidratado, uma substância cristalina branca e ortorrômbica, que pode ser precipitada pela adição de uma fonte de magnésio (OYAMA, 2013; CASTRO, 2014), tem sido crescentemente realizada por operadores de sistemas de tratamento de águas residuárias por todo o planeta. Segundo Oyama (2013), esse composto possui baixa solubilidade em água, é altamente solúvel em soluções ácidas e altamente insolúvel em soluções alcalinas, ocorrendo a sua precipitação em intervalos de pH em torno de 9,0. A estruvita é composta por 5,7% de N, 29% de P₂O₅ e 0% de K₂O (CASTRO, 2014), e pode ser recuperada por precipitação controlada das águas residuárias, lixiviados de aterros sanitários, lixo industrial, e dejetos de animais (BATTISTONI et al., 1997; SCHUILING; ANRADE, 1999; ADNAN et al., 2003; FORREST et al., 2008 apud FERNANDES; LUZ; CASTILHOS, 2010). A razão da escolha pela precipitação de estruvita, segundo Cornel e Schaum (2009), se dá principalmente por ser uma alternativa simples, sem riscos potenciais à saúde e que satisfaz critérios ecológicos.

A recuperação de estruvita surge como uma alternativa importante para ajudar os operadores de ETARs a alcançar os parâmetros determinados na legislação atual. “O fósforo presente no lodo e nas correntes secundárias das ETARs pode, então, ser visto como um recurso que deve ser recuperado e reutilizado como fertilizante” (METCALF; EDDY, 2016, p. 1642) ao invés de ser removido e descartado como resíduo.

Pensando no atendimento das legislações vigentes e nos benefícios ambientais e econômicos advindos da recuperação e comercialização deste cristal, nos últimos anos diversas empresas têm investido no desenvolvimento e patenteamento de tecnologias para recuperação de fósforo, sendo muitas delas para recuperação de estruvita. Essas tecnologias diferem basicamente pela origem da matéria utilizada e pelo processo de cristalização (SARTORIUS; VON HORN; TETTENBORN, 2012). Ainda de acordo com os autores, em geral, para recuperação de estruvita a matéria prima utilizada são as correntes secundárias, e o processo é o de cristalização.

De acordo com Fattah (2012), a principal diferença entre a precipitação convencional e o processo de cristalização é que no processo de cristalização a transformação é controlada com precisão. Isso resulta na formação de pelotas de estruvita com um tamanho variando de 1 a 5 mm, e o tamanho desejado depende do uso previsto para o produto. A recuperação de estruvita com granulometria maior é preferível às partículas muito finas, que são difíceis de recuperar de uma fase líquida e processar para a obtenção de um produto que possa ser reutilizado. O objetivo do processo de recuperação de fósforo na forma de estruvita é obter um produto cristalizado, com alto grau de pureza, e características físicas que o qualifiquem para reuso como fertilizante.

Pequenas pelotas resultam em um produto para rápida solubilização, e as maiores em um produto para liberação lenta dos nutrientes (nitrogênio, fósforo e magnésio). Segundo Nieminem (2010), a maior diferença entre os dois processos é a velocidade da reação, já que a precipitação é bem mais rápida. No entanto a precipitação produz um produto amorfo (em pó), o que faz com que a cristalização da estruvita seja considerado um processo mais recomendado para recuperação de fósforo de águas residuárias concentradas em fósforo.

As correntes secundárias, são geradas na etapa de tratamento de efluentes em que ocorre a separação da água de lodos primários, secundários, combinados ou digeridos durante a etapa de processamento de sólidos (METCALF; EDDY, 2016; SARTORIUS; VON HORN; TETTENBORN, 2012). Essas correntes líquidas apresentam características físico-químicas e biológicas que impedem seu lançamento direto no ambiente. Os autores ainda acrescentam que a prática atual na maioria das estações de tratamento de águas residuárias é recircular essas correntes secundárias para a entrada da estação ou diretamente para o processo secundário de tratamento. Contudo, como essas correntes podem impactar significativamente no desempenho do processo secundário de tratamento, especialmente devido a suas elevadas concentrações de nutrientes, muitas estações as estão tratando separadamente e tecnologias para cristalização de estruvita são uma boa alternativa.

Segundo Sartorius, von Horn e Tettenborn (2012), a recuperação de fósforo a partir do lodo digerido é muito mais difícil e dispendiosa se comparada com a recuperação na fase líquida, pois o lodo concentra quase todas as substâncias tóxicas presentes nas águas residuárias.

Os principais fatores operacionais que devem ser considerados na recuperação de fósforo como estruvita segundo Metcalf e Eddy (2016) são: (1) necessidade de pré-tratamento das correntes secundárias, (2) controle de pH e da temperatura, (3) ajustes químicos, (4) uso de sementes para a formações dos cristais e (5) condições hidráulicas e de mistura.

Castro (2014) acrescenta que a relação entre o produto de solubilidade e o pH indica que a solubilidade da estruvita reduz à medida que o pH aumenta, atingindo uma faixa de solubilidade mínima em um intervalo de valores variando de 8,1 - 12,1. Contudo, na prática, os cristalizadores de estruvita não operam em valores de pH acima de 9,0. “Na faixa de valores de pH entre 8,0 e 8,8, a eficiência de recuperação de fósforo é superior a 80%, possibilitando a obtenção de estruvita com alto grau de pureza” (METCALF; EDDY, 2016, p. 1646).

Segundo Val del Río, Gómez e Corral (2017), a presença de outros íons na solução, também conhecidos como íons competidores (ou parasitas), afeta a performance

da cristalização da estruvita porque competem pelo magnésio e fosfato em outras reações de precipitação. Assim, a eficiência da cristalização da estruvita é afetada pela presença de íons como o cálcio e carbono.

Os principais custos associados à produção de estruvita estão relacionados aos gastos com reagentes químicos e à energia fornecida ao sistema (BATTISTONI et al., 2005; JAFFER et al., 2002; MÜNCH; BARR, 2001 apud CASTRO, 2014). “Para a obtenção de estruvita, utiliza-se como fonte de magnésio, geralmente, cloreto, hidróxido ou óxido de magnésio, e este último reage com a água e forma hidróxido de magnésio” (METCALF; EDDY, 2016, p. 1646). A escolha do produto químico a ser utilizado em cada processo varia e é baseada nas preferências do vendedor do sistema ou do usuário final e no custo do produto. De acordo com Dockhorn (2009), os custos desse processo estão principalmente relacionados à fonte de magnésio, responsável por 75% do custo total, e do reagente de ajuste de pH. Estudos demonstram que água do mar também pode ser utilizada como uma fonte de magnésio de baixo custo, bastante efetiva na precipitação de estruvita (CRUTCHIK; GARRIDO, 2011, CRUTCHIK; SÁNCHEZ; GARRIDO, 2013 apud CASTRO, 2014). Aos autores também verificaram que, para estações de tratamento localizadas em regiões afastadas do litoral, os custos referentes ao transporte podem comprometer a economia almejada.

5.4 Tecnologias para recuperação de estruvita a partir do tratamento de águas residuárias

Segundo Aidar (2012), a cristalização da estruvita para a recuperação do fósforo é considerada uma tecnologia de baixo custo. Sobre a estruvita, este autor considera que: (a) ela é considerada um fertilizante de grande valor no mercado devido às vantagens sobre os fertilizantes convencionais; (b) muitos reatores não necessitam de aeradores ou equipamentos mecânicos de alto custo e consumo de energia (requerem apenas bombas dosadoras e de recirculação); (c) apresentam um custo relativo ao consumo de produtos químicos muito baixo em comparação com os necessários para a remoção química de fósforo; (d) a remoção deste elemento diminui os custos de manejo do lodo (ou do sobrenadante), que seria liberado em

condições anaeróbias (SHU et al., 2006); (e) e soluciona o problema de incrustações nos sistemas de remoção biológica de fósforo.

De maneira geral, essas tecnologias têm a capacidade de remover e recuperar entre 80-90% de fósforo solúvel das águas residuárias, e entre 10-40% de nitrogênio (VENNECKHAUTE, 2016). A faixa de tamanho dos cristais recuperados varia de 0,5 a 5,0mm dependendo do uso final pretendido.



Figura 16 – Diferentes tamanhos de cristais de estruvita produzidos pela empresa Ostara.
Fonte: Britton (2009).



Figura 17 - Diferentes tamanhos de cristais de estruvita produzidos por diferentes empresas.
Fonte: TCE (2014).

Segundo Val del Río, Gómez e Corral (2017), as tecnologias para cristalização de estruvita em ETARs têm o potencial de gerar um produto comercializável, que pode ser utilizado separadamente ou em combinação com fertilizantes de origem mineral. A estruvita pode ser produzida usando diferentes tecnologias, e a escolha da mesma é fator determinante na qualidade do produto obtido. O tamanho da partícula da estruvita, por exemplo, pode variar com as condições de operação e a configuração do reator utilizado. Em relação ao tamanho das partículas, a estruvita pode ser dividida em duas categorias: cristais finos e “pelotas”. Para se obter um produto adequado para aplicação em terras agrícolas, a estruvita em “pelotas”, ou seja, cristais de maiores diâmetros, é recomendada. Esses cristais maiores são muito mais fáceis de serem gerenciados e transportados do que os cristais finos (amorfo). Assim, a qualidade do produto é determinante para a facilidade de

utilização da estruvita e, conseqüentemente, pode influenciar na rentabilidade do processo de cristalização.

No esgoto o fósforo é encontrado em forma solúvel, expresso como ortofosfato $PO_4\text{-P}$, no entanto a recuperação economicamente viável requer uma fase líquida contendo 50 - 60 mg/L de $PO_4\text{-P}$ (CORNEL; SCHAUM, 2009). Nieminen (2010) detalhou a concentração de fósforo e o potencial de recuperação em cada uma das etapas com potencial de recuperação (Tabela 5):

Tabela 5 – Fluxo e concentração de fósforo (litros/per capital/ dia).

	Volume / fluxo de massa	Fluxo relativo de volume-massa	Concentração de fósforo	Potencial de recuperação
Efluente	200 l/hab/d	100%	<5mg/l	Máx.55%
Licor de lodo	1-10 l/hab/d	0,5 – 5%	20 – 100 mg/l	Máx.50%
Lodo desaguado	0,15 l/hab/d	0,075%	~10 g/kg TS	~90%
Cinzas de lodo	0,03 kg/hab/d	0,015%	64 g/kg	~90%

Fonte: Adaptado de Nieminen (2010).

Diversas tecnologias já consolidadas são encontradas no mercado, sendo que a principal diferença no que concerne os processos entre elas é o local de onde a estruvita é precipitada (NIEMINEN, 2010). ETARs podem oferecer vários locais para a recuperação de estruvita, dependendo da tecnologia adotada. Tendo como referência a Figura 18, em ETARs do tipo Lodos Ativados configuradas para a remoção de nutrientes N e P (muito comum na Europa e América do Norte), as opções incluem a fase líquida (A1-3), lodo (B1-5) e cinzas de lodo mono-incineradas (C) (URDALEN, 2013).

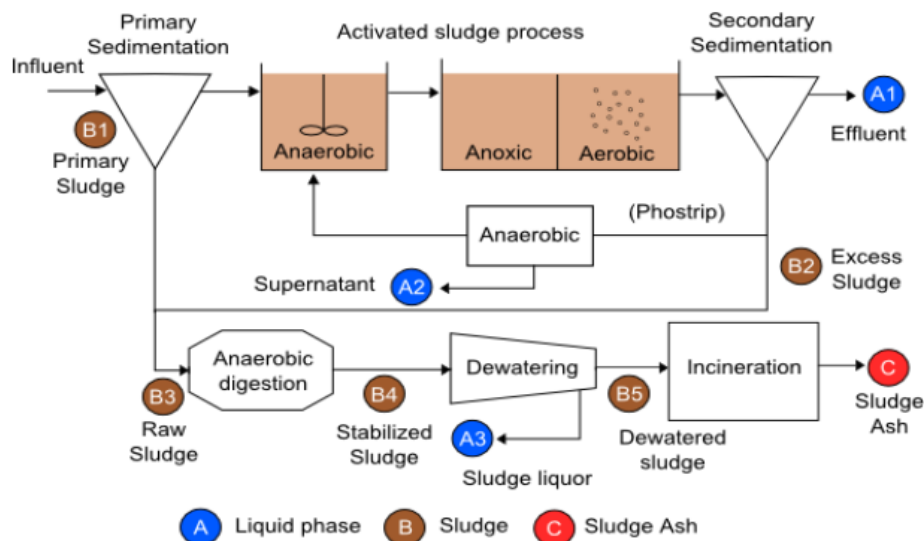


Figura 18 – Possíveis locais de recuperação de fósforo em ETEs do tipo Lodos Ativados.

Fonte: Cornel; Schaum (2009).

De acordo com Cornel e Schaum (2009), a recuperação da fase líquida é limitada a 50-60% do fósforo entrante em uma ETAR do tipo apresentado na Figura 18, uma vez que o resto do fósforo é removido juntamente com o lodo. Uma vantagem para a recuperação da fase líquida é que as tecnologias podem ser facilmente instaladas em plantas existentes (KABBE, 2013).

Porém, na medida que 90-95% do fósforo entrante é incorporado no lodo, as tecnologias que recuperam o fósforo do lodo de esgoto têm uma recuperação potencial de 90-95%. Devido ao alto potencial de recuperação do lodo de esgoto, foi dado muito interesse em recuperar o fósforo nesta fase. Segundo Urdalen (2013), historicamente o lodo foi aplicado como fertilizantes, entretanto os problemas relacionados a contaminantes como metais pesados, agentes patogênicos e poluentes orgânicos têm restringido as regras desse tipo de aplicação em diversos países. Este é o caso do Brasil, que dispõe de uma legislação muito restritiva no que concerne o uso do lodo na agricultura (Resolução N° 375, de 29 de agosto de 2006). Por isso, as tecnologias que recuperam o fósforo do lodo de esgoto devem estrategicamente ser capazes de lidar com esses contaminantes.

Com as restrições impostas para utilização de lodo na agricultura, o mesmo passou a ser incinerado (tipicamente na Europa) e o resíduo final é chamado de cinza de

lodo de esgoto. Segundo Urdalen (2013), apenas o lodo mono-incinerado é atraente para a recuperação de fósforo, uma vez que o lodo co-incinerado (juntamente com outros resíduos) geralmente possui baixas concentrações de fósforo e elevados níveis de contaminantes. O volume de lodo incinerado é bastante reduzido, assim como os poluentes orgânicos e patógenos orgânicos são destruídos. Petzet e Cornel (2013) calculam que cerca de 90% da carga de fósforo aplicada em uma ETE configurada para a remoção de N e P está contida nas cinzas de lodo de esgoto, e que as mesmas são fáceis de transportar devido ao seu menor volume (se comparado ao lodo puro).

Cornel e Schaum (2009) elaboraram o balanço de massa do fósforo em Estações de Tratamento de Esgoto e concluíram que a precipitação do nutriente a partir do lodo é a via mais interessante do ponto de vista quantitativo (Figura 19).

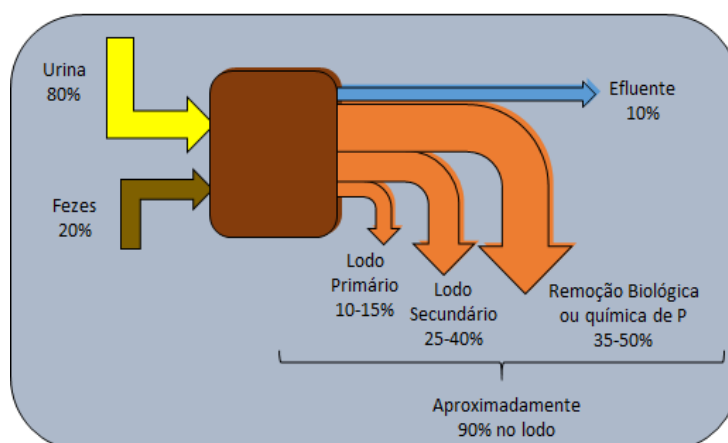


Figura 19 – Balanço e de massa do fósforo em ETARs.
Fonte: Adaptado de Cordel; Schaum (2009).

Castro (2014) classifica as tecnologias para recuperação de estruvita em precipitação em reator de leito fluidizado ou agitado por injeção de ar (em inglês Fluidized Bed Reactor – FBR), e precipitação em reator continuamente agitado (em inglês Continuous Stirred Tank Reactor – CSTR). De acordo com o autor, os reatores de leito fluidizado são definidos como:

“Processo em que há a precipitação espontânea das partículas de estruvita, a partir de sobrenadantes, com a adição dos reagentes químicos necessários. Sistemas com injeção de ar favorecem o arraste de gás carbônico, que promove a elevação do pH sem a adição de reagentes químicos. A suspensão é controlada pelo fluxo ascendente do líquido ou injeção de ar que garantem a agitação contínua das partículas no reator, que se comportam como um fluido denso” (CASTRO, 2014, p. 118).

Já o reator agitado é definido pelo autor como um processo simples e estável, que promove a precipitação ocorre em um reator agitado mecanicamente, possuindo um sedimentador integrado para a retenção dos cristais de estruvita (CASTRO, 2014).

O autor ainda acrescenta que os reatores de leitos fluidizados são mais comumente empregados em estudos envolvendo processos de precipitação de estruvita. Segundo Mangin e Klein (2004 apud CASTRO, 2014, p.118), as tecnologias que optam por esse tipo de reator “possuem um design que possibilita sua inserção como etapa adicional em linhas de tratamento de efluentes em operações contínuas”. Sendo assim, destaca-se a vantagem de poder instalar esse tipo de reator em sistemas já existentes, sendo necessário poucas adaptações. Mesmo com o predomínio de estudos em reatores de leito fluidizado, algumas empresas optam por sistemas que envolvem, exclusivamente, a tecnologia dos reatores agitados (ALI; SCHNEIDER, 2008; PASTOR et al. 2008, 2010; MARTÍ et al., 2010; SCHNEIDER; WALLACE; TICKLE, 2013 apud Castro, 2014).

Independentemente da tecnologia escolhida, geralmente são realizados ensaios em escala piloto com as tecnologias de cristalização disponíveis para a avaliação do seu desempenho e para a obtenção dos parâmetros de operação e dosagem de produtos químicos a serem utilizados no projeto da unidade em escala real (METCALF; EDDY, 2016).

Algumas tecnologias para recuperar estruvita já estabelecidas no mercado são: Airprex process[®], Ostara PEARL[®], Unitika Phosnix[®], ANPHOS[®], PHOSPAQ[™], NuReSys[®], Multiform Harvest[™] e Crystalactor[®]. As principais características de cada uma das tecnologias citadas foram resumidas em Quadros (2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, e 9). Todas elas foram reunidas no Quadro 10 para uma melhor comparação entre as tecnologias.

5.4.1 Processo Airprex[®]

O procedimento AirPrex foi desenvolvido pelo Berliner Wasserbetriebe, empresa de saneamento da capital alemã, em colaboração com o Instituto de Tecnologia de Berlim, e foi implantado primeiramente na ETE Waßmannsdorf. A ETE em

Waßmannsdorf tem processo de tratamento secundário com remoção biológica de fósforo. A formação espontânea de estruvita por muito tempo foi um problema na ETE de Waßmannsdorf, causando incrustações nos equipamentos de tratamento de lodo. As análises das incrustações mostraram que o material precipitado era principalmente estruvita com pequenas porções de fosfato de cálcio, por isso a escolha por uma tecnologia para recuperação desse composto em específico (NIEMINEN, 2010; METCALF; EDDY, 2016).

A Berliner Wasserbetriebe patenteou um fertilizante de alta qualidade chamado Berlin Pflanze® (Figura 20), obtido a partir da extração de nutrientes do tratamento de esgoto da ETE Waßmannsdorf (estruvita). De acordo com Maaß, Grundmann e Polach (2014), a implantação desta tecnologia custou 2,3 milhões de euros, e em condições estáveis de operação do sistema é possível uma produção anual de até 900 t de estruvita. Foi a primeira empresa a registrar a estruvita recuperada a partir do tratamento de águas residuárias no REACH (Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals), regulamento que representa os requisitos oficiais para o uso e venda de todos os produtos químicos na União Europeia (HUKARI, HERMANN E NÄTTORP, 2016). O produto é composto por magnésio, fósforo e nitrogênio na proporção 12-23-5 e foi premiado em 2015 com o Prêmio GREENTEC (BERLINER WASSERBETRIEBE, 2016). De acordo com a empresa, o Berlin Pflanze® é cristalino, inodoro e é constantemente monitorado de acordo com os regulamentos relativos a adubos. A estruvita é vendida para ser usada como matéria-prima na produção de fertilizantes (NIEMINEN, 2010). Os preços de venda do produto apresentados atualmente no site da empresa são de €2,50 por 0,5Kg do produto, €4,0 por 2,0 Kg do produto, e €10,0 por 5,0Kg do produto (BERLINER WASSERBETRIEBE, 2016). As principais informações a respeito desta tecnologia estão resumidas no Quadro 2:

Processo - Tecnologia	Empresa Desenvolvedora	Tipo de Reator	Tipo de influente	Nome produto recuperado
AirPrex	Berliner Wasserbetriebe	FRB	Lodo digerido / licor de lodo	Estruvita – Berliner Pflanze

Método	Produtos Químicos	Nº Instalações	Mercados	Eficiência de recuperação
---------------	--------------------------	-----------------------	-----------------	----------------------------------

Cristalização	MgCl ₂ / Floculante (Rockaway PX60N)	Alemanha (2) Holanda (1)	Indústria de fertilizantes	-
---------------	---	--------------------------------	-------------------------------	---

Quadro 2 - Resumo processo Airprex

Fonte: Metcalf; Eddy (2016); Kataki et al. (2016); Desmidt et al. (2015); Val del Rio; Gómes; Coral (2017); Nieminen (2010).



Figura 20 - Produto Berlin Pflanze®.
Fonte: Berliner Wasserbetriebe (2016).

5.4.2 Processo Ostara Pearl™

O processo Pearl® foi implantado em grande escala pela empresa Ostara Nutrients Recovery Technologies Inc., tendo sido desenvolvido na Universidade da Colúmbia Britânica (Canadá) para comercialização de fosfato de magnésio amoniacal (EUA) (METCALF; EDDY, 2016.) O Grupo Ostara comercializa a estruvita recuperada como produto final sob o nome de Crystal Green™, usado como fertilizante de liberação lenta especialmente em campos de golfe e gramados municipais (NIEMINEN, 201; DESMIDT, 2015).

O reator Pearl® é um cristalizador de leiteo fluidizado, e os produtos químicos utilizados para a cristalização da estruvita e ajuste do pH são MgCl₂ e NaOH, respectivamente (METCALF; EDDY, 2016; VAL DEL RÍO; GÓMEZ; CORRAL, 2017). De acordo com Nieminen (2010), o Crystal Green® tem uma fórmula nutritiva de N-P 5-28, contendo também 10% de magnésio. Atualmente, as instalações da Ostara somadas têm uma capacidade para produzir até 17.000 toneladas por ano de fertilizante Crystal Green. Nos últimos dois anos, todos os fertilizantes produzidos foram vendidos comercialmente à rede de misturadores e distribuidores da Ostara, que por sua vez estão vendendo para os produtores nos setores de grama e agricultura - validando a demanda por nutrientes recuperados de alta

qualidade (THE SOURCE, 2018). As principais informações a respeito desta tecnologia estão resumidas no Quadro 3:

Processo - Tecnologia	Empresa Desenvolvedora	Tipo de Reator	Tipo de influente	Nome produto recuperado
Ostara Pearl®	University British Columbia / Ostara	FRB	Líquido de lodo desaguado	Estruvita – Crystal Green

Método	Produtos Químicos	Nº Instalações	Mercados	Eficiência de recuperação
Cristalização	NaOH / MgCl ₂	>10	Campos de golfe e gramados municipais	10–40% NH ₃ – N 80-90% P

Quadro 3 - Resumo processo Ostara Pearl®.

Fonte: Metcalf; Eddy (2016); Kataki et al. (2016); Desmidt et al. (2015); Val del Rio; Gómes; Coral (2017); Nieminen (2010).



Figura 21 - Fluxograma processo Ostara Pearl®

Fonte: Ostara (2017).



Figura 22 - Produto Crystal Green.

Fonte: Ostara (2017).

5.4.3 Processo Phosnix®

O processo Phosnix foi desenvolvido no Japão pela empresa Unitika Ltd. e a primeira planta está em operação naquele país desde 1987 (KATAKI et al., 2016). Apesar da sua relativa longevidade, pouca informação está disponível na literatura sobre o processo. Os reatores Phosnix têm como capacidade máxima o tratamento de 500 m³/d e mínima de 150 m³/d. Pode tratar fluxos com 100 a 150 mg/l de P-

PO_4^{3-} , recuperando 80 a 90% de $P-PO_4^{3-}$ como estruvita (UENO E FUJI, 2001 apud DESMIDT et al., 2015). A estruvita produzida é vendida para empresas de fertilizantes, que, de acordo com estes autores, não fazem uso direto como fertilizante, mas misturam com outros materiais inorgânicos e orgânicos e ajustam a proporção de nitrogênio, fósforo e potássio. As principais informações a respeito desta tecnologia estão resumidas no Quadro 4:

Processo - Tecnologia	Empresa Desenvolvedora	Tipo de Reator	Tipo de influente	Nome produto recuperado
Phosnix	Unitika Ltd.	FRB	Água residuária após digestão ou tratamento do lodo.	Estruvita

Método	Produtos Químicos	Nº Instalações	Mercados	Eficiência de recuperação
Cristalização	NaOH / $Mg(OH)_2$	Japão (2)	Indústria de fertilizantes	10–40% $NH_3 - N$ 80-90% P

Quadro 4 - Resumo processo Phosnix.

Fonte: Metcalf; Eddy (2016); Katakai et al. (2016); Desmidt et al. (2015); Val del Rio; Gómes; Coral (2017); Nieminen (2010).



Figura 23 - O processo Phosnix no centro de clarificação oriental do lago Shinji da prefeitura de Shimane, Japão.

Fonte: Nawa (2009) apud Nieminen (2010).

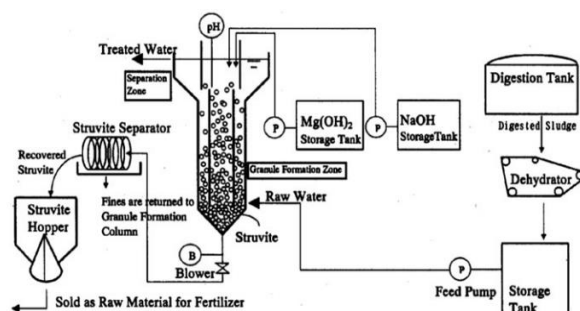


Figura 24 - Fluxograma do processo PHONIX.

Fonte: Ueno e Fuji (2001 apud Desmidt, 2015).

5.4.4 Processo Anphos

O processo ANPHOS foi desenvolvido pela Colsen e é operado em batelada com base em dois reatores separados (LODDER; MEULENKAMP, 2011 apud DESMIDT, 2015). No primeiro reator, as águas residuárias são aeradas, o que resulta em um aumento do pH devido à remoção de CO₂. No segundo tanque, o óxido de magnésio é adicionado às águas residuárias para recuperar fosfato como estruvita. Após a reação, a estruvita é precipitada, desidratada e seca. A tecnologia ANPHOS foi implementada pela primeira vez em uma escala completa na estação de tratamento de águas residuárias de uma empresa de processamento de batata nos países baixos. Ela é capaz de remover 80-90% do fosfato e pode ser aplicada em todos os tipos de águas residuárias com níveis de fósforo maiores que 50 mg/L (COLSEN, 2018). A estruvita obtida é composta por cristais finos que possuem a estrutura da areia (DESMIDT, 2015). As receitas advindas do processo ANPHOS® consistem na comercialização da "estruvita" e uma redução significativa dos custos operacionais (COLSEN, 2018). As principais informações a respeito desta tecnologia estão resumidas no Quadro 5:

Processo - Tecnologia	Empresa Desenvolvedora	Tipo de Reator	Tipo de influente	Nome produto recuperado
Anphos	Colsen bv	-	Efluente anaeróbio / Água de desaguamento de lodo	Estruvita

Método	Produtos Químicos	Nº Instalações	Mercados	Eficiência de recuperação
Cristalização	MgO	Holanda (4)	Exportado para Alemanha e misturado com outros fertilizantes	-

Quadro 5 - Resumo do processo Anphos.

Fonte: Metcalf; Eddy (2016); Kataki et al. (2016); Desmidt et al. (2015); Val del Rio; Gómes; Coral (2017); Nieminen (2010).

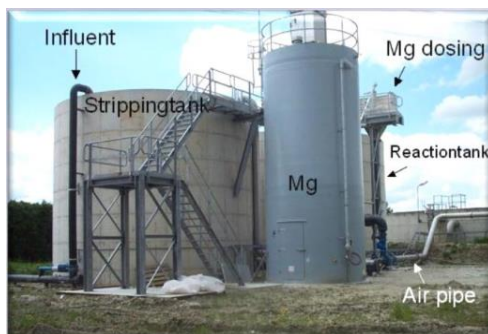


Figura 20 - Tecnologia Anphos.
Fonte: Colsen (2018).

5.4.5 Processo Phospa_q

A tecnologia Phospa_qTM foi desenvolvida pela Paques (Holanda) e compreende um CSTR aerado (Reator com mistura completa e fluxo contínuo) (KATAKI et al., 2016; DESMIDT, 2015). Como resultado da aeração, o pH aumenta com a remoção de CO₂ e fornece mistura. Além disso, o óxido de magnésio é adicionado ao reator para remover o fosfato como estruvita a um pH de 8,2 a 8,3. Um sistema separador patenteado, situado na parte superior do reator, é aplicado para reter estruvita no sistema (DRIESSEN et al., 2009). O processo tem como vantagem a possibilidade de implantação modular para a recuperação fósforo. Por dosar MgO ao invés de MgCl₂, o processo elimina a necessidade de dosagem adicional de soda cáustica (NaOH). Os cristais formados têm um tamanho médio de cerca de 0,7 mm e a eficiência média de remoção de fosfato é de cerca de 70-95% (DRIESSEN et al., 2009; PAQUES, 2018). As principais informações a respeito desta tecnologia estão resumidas no Quadro 6:

Processo - Tecnologia	Empresa Desenvolv.	Tipo de Reator	Tipo de influente	Nome produto recuperado
Phospa _q	Paques bv	CSTR	Água de desaguamento de lodo	Estruvita

Método	Produtos Químicos	Nº Instalações	Mercados	Eficiência de recuperação
Cristalização	MgO	3	Exportado para Alemanha e misturado com outros fertilizantes	10-40% NH ₃ – N 70-95% P

Quadro 6 - Resumo processo Phospa_q.

Fonte: Metcalf; Eddy (2016); Kataki et al. (2016); Desmidt et al. (2015); Val del Rio; Gómes; Coral (2017); Nieminen (2010).

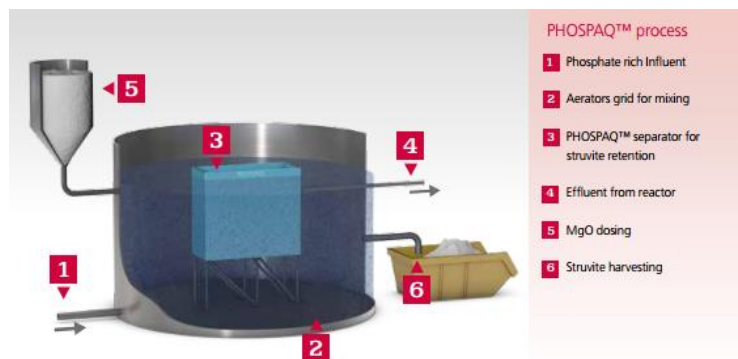


Figura 26 - Fluxograma do processo Phospaq
Fonte: PAQUES (2018).

5.4.6 Nuresys

O processo NuReSys® (Nutrient Recovery SYStem) foi desenvolvido pela Akwadok/NuReSys (Bélgica). Este processo consiste em um tanque de extração de CO₂ seguindo por um cristalizador com agitação mecânica e uma região de sedimentação (METCAF; EDDY, 2016). A velocidade de agitação e a taxa de remoção do produto são ajustadas para permitir a formação de cristais de estruvita com tamanho adequado. Como fonte de magnésio, é utilizado o cloreto de magnésio, e o ajuste do pH, mantido entre 8,1 e 8,3, é feito com NaOH (METCALF; EDDY, 2016).

O produto recuperado foi identificado como 100% de estruvita pela análise de Difractometria de Raios X (DRX) e atende às diretrizes locais (Bélgica) sobre a composição necessária para reutilização (BIOSTRU) (MOERMAN, 2012 apud DESMIDT, 2015). O BIOSTRU, nome comercial do produto recuperado, pode ser utilizado como fertilizante ou como condicionador de solo. Na prática, uma parte do produto final é exportada para um viticultor na França, e a outra parte da estruvita produzida é misturada com composto (MOERMAN, 2012 apud DESMIDT, 2015). As principais informações a respeito desta tecnologia estão resumidas no Quadro 7:

Processo - Tecnologia	Empresa Desenvolvedora	Tipo de Reator	Tipo de influente	Nome produto recuperado
NuReSys	Akwadok bvba	CSTR	Efluente de digestão anaeróbia / lodo digerido	Estruvita - Biostru

Método	Produtos Químicos	Nº Instalações	Mercados	Eficiência de recuperação
Cristalização	MgCl ₂ , NaOH	7	Exportado para a França e utilizado na produção de vinhos	5-20% N 85% P

Quadro 7 - Resumo processo Nuresys.

Fonte: Metcalf; Eddy (2016); Kataki et al. (2016); Desmidt et al. (2015); Val del Rio; Gómes; Coral (2017); Nieminen (2010).

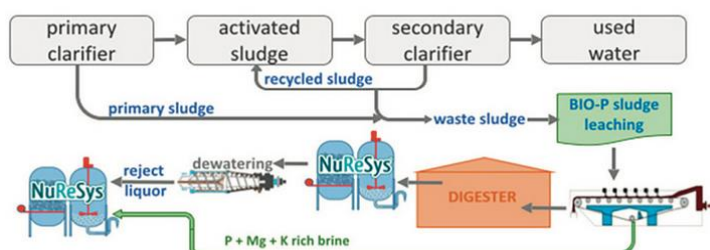


Figura 21 - Fluxograma do processo Nuresys.
Fonte: NureSys (2017).



Figura 28 - Produto comercializado BIO-STRU.
Fonte: NureSys (2017).

5.4.7 Tecnologia Multiform

A tecnologia patenteada Multiform foi desenvolvida pela Multiform Harvest Inc. (EUA), e em 2012 duas plantas foram instaladas em ETEs em Boise, Idaho e a cidade de Yakima, em Washington. A estruvita é colhida a partir do fundo do cristalizador de leito fluidizado em forma de cone, resultando em uma redução de 80% de fósforo e 20% de nitrogênio de águas residuárias, respectivamente (KATAKI et al., 2016). O cristalizador consiste em uma seção cônica e uma região de separação localizada na parte superior. O tempo de detenção hidráulica é, geralmente, inferior a 60 minutos. Para a formação da estruvita, é feita a injeção, na base do cone, de cloreto de magnésio e hidróxido de sódio por meio de um sistema patenteado (METCALF; EDDY, 2016). O produto final vendido pela

empresa tem como composição 5,6% de N, 29% de P_2O_5 , 0% de K_2O e 16% de MgO. As principais informações a respeito desta tecnologia estão resumidas no Quadro 8:

Processo - Tecnologia	Empresa Desenvolvedora	Tipo de Reator	Tipo de influente	Nome produto recuperado
Multiform	Multiform Harvest Inc	FRB	-	Estruvita

Método	Produtos Químicos	Nº Instalações	Mercados	Eficiência de recuperação
Cristalização	$MgCl_2$, NaOH	-	-	10–40% $NH_3 - N$ 80-90% P

Quadro 8 - Resumo processo Multiform Harvest.

Fonte: Metcalf; Eddy (2016); Katakai et al. (2016); Desmidt et al. (2015); Val del Rio; Gómes; Coral (2017); Nieminen (2010).

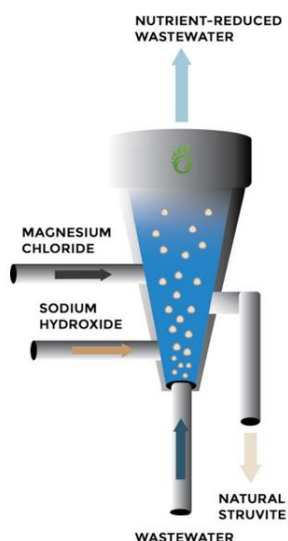


Figura 29 - Fluxograma processo Multiform Harvest.

Fonte: Multiform Harvest (2018)



Figura 30 - Produto comercializado pela Multiform Harvest.

Fonte: Multiform Harvest (2018).

5.4.8 Crystalactor Process

A tecnologia Crystalactor remove o fosfato de águas residuárias municipais ou industriais sob a forma de grânulos de fosfato de cálcio, fosfato de magnésio ou estruvita (fosfato de amônio e magnésio) por dosagem de hidróxido de cal ou de magnésio ou uma combinação de soda cáustica e cloreto de magnésio como

reagentes. A formação de estruvita ocorre por dosagem de sais de magnésio se a amônia necessária para a formação de estruvita estiver presente na água. A concentração de fosfato geralmente pode ser reduzida para 0.2 - 0.5 mg/L. A maior parte do fosfato é removida sob a forma de grânulos do reator. O tempo de detenção hidráulica com base na vazão da corrente secundária é inferior a 60 minutos (METCALF; EDDY, 2016). A filtração de efluentes é geralmente necessária para remover os flocos de fosfato suspensos que estão presentes no efluente do reator. O coração da planta de tratamento Crystalactor é o reator de *pellets* (pelotas), parcialmente preenchido com material de semeadura, como areia ou pequenos grânulos triturados. O Crystalactor é mais adequado para tratar fluxos com concentrações de fosfato acima de 25 mg/L PO₄-P. Nas usinas de tratamento de águas residuárias municipais, ela pode ser usada para tratar um fluxo concentrado de fosfato produzido pela remoção biológica de fosfato (Royal HoskoningDHV, 2018). As principais informações a respeito desta tecnologia estão resumidas no Quadro 9:

Processo - Tecnologia	Empresa Desenvolvedora	Tipo de Reator	Tipo de influente	Nome produto recuperado
Crystalactor	DHV Water bv	FBR	Efluente Anaeróbio	Estruvita

Método	Produtos Químicos	N° Instalações	Mercados	Eficiência de recuperação
Cristalização	Areia, NaOH, H ₂ SO ₄ , Ca(OH) ₂	2	Vendido como matéria Prima secundária para a empresa Thermphos (ING).	85-95% P para estruvita

Quadro 9 - Resumo processo Crystalactor.

Fonte: Metcalf; Eddy (2016); Kataki et al. (2016); Desmidt et al. (2015); Val del Rio; ómes; Coral (2017); Nieminen (2010).



Figura 31 - Cristalizador instalado em uma indústria química na cidade de Nanjing, China.
Fonte: Royal HaskoningDHV (2018).

Processo - Tecnologia	Empresa Desenvolvedora	Tipo de Reator	Tipo de influente	Nome produto recuperado	Método	Produtos Químicos	Mercados	Eficiência de recuperação
AirPrex	Berliner Wasserbetriebe	FBR ¹	Lodo digerido / licor de lodo	Estruvita – Berliner Pflanze	Cristalização	MgCl ₂ / Floculante (Rockaway PX60N)	Indústria de fertilizantes	-
Ostara Pearl®	University British Columbia / Ostara	FBR	Líquido de lodo desaguado	Estruvita – Crystal Green	Cristalização	NaOH / Mg(OH) ₂	Campos de golfe e gramados municipais	10–40% NH ₃ – N 80-90% P
Phosnix	Unitika Ltd.	FBR	Água residuária após digestão ou tratamento do lodo.	Estruvita	Cristalização	NaOH / Mg(OH) ₂	Indústria de fertilizantes	10–40% NH ₃ – N 80-90% P
Anphos	Colsen bv	-	Efluente anaeróbio / Água de rejeito	Estruvita	Cristalização	MgO	Exportado para Alemanha e misturado com outros fertilizantes	-
Phospaq	Paques bv	CSTR	Água de rejeito	Estruvita	Cristalização	MgO	Exportado para Alemanha e misturado com outros fertilizantes	10-40%NH ₃ – N 80% P

NuReSys	Akwadok bvba	CSTR	Efluente de digestão anaeróbia / lodo digerido	Estruvita - Biostru	Cristalização	MgCl ₂ , NaOH	Exportado para a França e utilizado na produção do vinhos	5-20% N 85% P
Multiform	Multiform Harvest Inc	FBR	-	Estruvita	Cristalização	MgCl ₂ , NaOH	-	10-40% NH ₃ - N 80-90% P
Crystalactor [®]	DHV Water bv	FBR	Efluente Anaeróbio	Estruvita	Cristalização	Areia, NaOH, H ₂ SO ₄ , Ca(OH) ₂	Vendido como matéria Prima secundária para a empresa Thermphos (ING).	85-95% P para estruvita

Quadro 10 – Quadro resumo das características das tecnologias de recuperação de estruvita.

Fonte: Metcalf; Eddy (2016); Kataki et al. (2016); Desmidt et al. (2015); Val del Rio; Gómez; Coral (2017); Nieminen (2010).

Notas:

¹FBR: Fluidized Bed Reactor – Reator de Leito Fluidizado.

²CSTR: Continuous Stirred Tank Reactor – Reator Continuamente Agitado.

5.5 Análise da atual configuração do mercado de tecnologias para recuperação e reciclagem de estruvita, e perspectivas futuras

Técnicas para precipitação de estruvita já são conhecidas há muitos anos, e no fim do século passado já haviam sido desenvolvidas as primeiras tecnologias em escala piloto para estudos de precipitação controlada. Com as crescentes preocupações acerca da exaustão das minas de rocha fosfática, a recuperação de estruvita de águas residuárias tornou-se necessária e um número cada vez maior de empresas exploram esse mercado.

Por se tratar de um mercado relativamente novo, ainda não existe uma empresa dominante. O diagnóstico é de que existem muitas empresas principalmente no setor de saneamento já consolidadas oferecendo suas tecnologias no mercado internacional. Muitas outras empresas cujas tecnologias hoje se encontram em fase experimental em escala piloto se preparam para entrar no mercado, como, por exemplo: Stuttgarter Verfahren, CAFR (NALVA-DE), Ceres (Ceres Milieutechnik - BE), Nutritec (Sustec – NL) e PRISA (Aachen University – DE) (VANECKHAUTE, 2016; SARTORIUS; VON HORN; TETTENBORN, 2012). Apesar de algumas empresas assumirem posição de destaque hoje em dia, especialmente devido a investimentos em marketing e publicidade, em breve muitas outras se apresentarão como opção ofertando tecnologias e serviços bastante semelhantes.

Em um mercado bastante competitivo como esse, cada vez mais as empresas terão que buscar a inovação para conseguirem se diferenciar das demais. Silva et al. (2002 apud HADDAD, 2010) estabelece que a inovação é um processo que gera um novo produto, uma nova aplicação, uma nova prática ou um novo sistema. Ainda segundo os autores, inovar é uma forma criativa de mudar o aprendizado para desenvolver ou inventar novas soluções. De acordo com Marins (2010 pag. 25), “quando os mercados para o novo produto atingem seu máximo e a competitividade é baseada no preço, há uma forte pressão para inovar com a introdução de novos processos de racionalização e reconstrução”.

Por ser um mercado de tecnologia intensiva, a busca pela inovação é constante, pois dela depende a sobrevivência das empresas e também o alcance de vantagens competitivas. Estratégias agressivas por parte de empresas que buscam a liderança técnica e de mercado através da experiência adquirida na introdução de novos produtos frente a seus concorrentes” (HADDAD, 2010, p. 52), têm sido adotadas por

algumas empresas atuantes neste mercado, como, por exemplo, a Ostara e Multiform Harverst. De acordo com o autor, Schumpeter estabelece que esse tipo de estratégia é o mecanismo necessário para dar ensejo à chamada “destruição criativa”. Ainda de acordo com o autor, um processo de destruição criativa acontece pois:

[...] “as firmas inovadoras poderão se expandir e, com isso, poderão ocasionar o desaparecimento das firmas que não são inovadoras. [...] O mesmo ocorre com produtos, o aparecimento de inovações (novos produtos) acaba levando produtos já existentes no mercado a se retirarem, pois o consumidor aprende a buscar sempre o novo” (HADDAD, 2010, p. 30).

O fato é que as estratégias adotadas pelas empresas já existentes, o surgimento de novas empresas com perfil inovador e de novas tecnologias disruptivas, e o amadurecimento do mercado, transformarão radicalmente o cenário em um futuro próximo. De acordo com Schumpeter (HADDAD, 2010) os produtos passam por ciclos de crescimento alternados e apresentam quatro fases sequenciais que são: Ascensão ou *boom*; Recessão, quando o nível de atividade reduz; Depressão; e Recuperação, quando o mercado inicia uma nova fase de crescimento (HADDAD, 2010). A julgar pela quantidade de empresas existentes disputando fatias desse mercado, assim como de empresas entrantes, acredita-se que o mercado de tecnologias para recuperação de estruvita esteja ainda na fase de “ascensão”, restando ainda passar por todas as fases subsequentes até que se estabeleça uma nova fase de crescimento.

5.6 Conclusão

As informações reunidas neste capítulo permitem concluir que as condições necessárias para a recuperação de estruvita a partir do tratamento de águas residuárias encontram-se bem estabelecidas na literatura, sendo encontradas poucas diferenças entre as pesquisas avaliadas. Em resumo, é possível concluir que já há consenso de que a recuperação de estruvita de maneira controlada é viável tecnicamente, sendo necessário considerar principalmente as características da água residuária e o tipo de sistema que tratamento onde se pretende instalar a tecnologia para precipitar estruvita.

A escolha da tecnologia para precipitação de estruvita pelo cliente deve levar em consideração diversos fatores, como, por exemplo, as características do efluente, gasto com CAPEX e OPEX, mercado para o qual se pretende vender o produto final,

etc. Castro (2014) observa que estudos em escala de laboratório e em escala piloto são etapas prévias importantes para este tipo de projeto, e têm como objetivo garantir que o investimento feito seja condizente com o retorno esperado. O número de tecnologias disponíveis no mercado tende a crescer no futuro próximo, fato positivo para que os clientes tenham um maior leque de opções para escolha.

As tecnologias citadas no presente estudo foram desenvolvidas e patenteadas em países desenvolvidos, onde há uma preocupação maior com os problemas ambientais atuais e futuros. Nestes países, os conceitos de Economia Circular e Nexus já estão bastante enraizados em suas culturas, e são utilizados para nortear o planejamento das ações. Surpreende o fato do Brasil, país com um dos maiores Produto Interno Bruto e população do planeta, gerador de grandes quantidades de água residuária, ainda não possuir grandes projetos relacionados à recuperação e reciclagem de estruvita.

Sendo assim, é necessário procurar entender as razões da não existência de projetos voltados para a recuperação e reciclagem desse produto no país. Uma análise mais detalhada se faz necessário para entender se os fatores são financeiros e econômicos, ausência de mercado consumidor ou relacionados à regulação e regulamentação vigentes.

5.7 Referências

AMBULKAR A. R. **Nutrient Pollution and Wastewater Treatment Systems**. Oxford Research Encyclopedia of Environmental Science. 2017. DOI: 10.1093/acrefore/9780199389414.013.495.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Atlas esgotos: despoluição de bacias hidrográficas**. Agência Nacional de Águas, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Brasília: ANA, 2017. ISBN: 978-85-8210-050-9

BERLINER WASSERBETRIEBE. Disponível em: <<http://www.bwb.de/content/language1/html/6946.php>>. Acesso em: fev.2018. [Online].

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução Conama nº 430/2011**, de 13 de maio de 2011. Disponível

em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>> Acesso em: 19 de março de 2018. [Online].

BRITTON, A. **Fertilizer products from the crystallisation from waste water: OSTARA Crystal Green (struvite)**. BALTIC 21 - Phosphorus Recycling and Good Agricultural Management Practice. Berlin. 2009.

CASTRO, S. R. **Precipitação de estruvita: recuperação de nitrogênio e fósforo utilizando fontes alternativas de reagentes**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2014.

COLSEN. Disponível em: <<https://www.colsen.nl/system/resources/BAhbBlSgOgZmSSlwMjAxNi8wMS8yNy8xMy81My8zNy82MTMvYW5waG9zX2VuX2ZseWVvLnBkZgY6BkVU/anphos-en-flyer.pdf>>. Acesso em: fev.2018. [Online].

CORNEL, P.; SCHAUM, C. **Phosphorus recovery from wastewater: needs, technologies and costs**. Water Science and Technology, v. 59, n. 6, p. 1069-1076, 2009.

DAIGGER, G. **Evolving Urban Water and Residuals Management Paradigms: Water Reclamation and Reuse, Decentralization, Resource Recovery**, Water Environment Research, **81**(8):809-823. 2009.

DESMIDT, E.; GHYSELBRECHT, K.; ZHANG, Y.; PINOY, L.; VAN DER BRUGGEN, B.; VERSTRAETE, W. **Global phosphorus scarcity and full-scale P-recovery techniques: a review**. Crit. Rev. Environmental Science & Technology; 45 (336–4). 2015

DOCKHORN, T. **About the Economy of Phosphorus Recovery**. In Ashley, K., Mavinic, D. and Koch, F. (eds), International Conference on Nutrient Recovery from Wastewater Streams, London, IWA Publishing, 145-158. 2009.

DRIESSEN, W.; ABMA, W.; VAN ZESSEN, E.; REITSMA, G.; HAARHUIS, R. **Sustainable treatment of reject water and industrial effluent by producing valuable byproducts**. In: Proceedings of 14th European Biosolids and Organic Resources Conference, Leeds, UK. 2009.

FATTAH, K. P. **Assessing Struvite Formation Potential at Wastewater Treatment Plants.** International Journal of Environmental Science and Development, Vol. 3, No. 6. 2012.

FERNANDES, F. R. C., DA LUZ, A. B., CASTILHOS, Z. C. **Agrominerais para o Brasil.** Capítulo 6. Rio de Janeiro: CETEM/MCT. 2010.

HADDAD E. W. **Inovação tecnológica em schumpeter e na ótica neo-schumpeteriana.** Trabalho de conclusão submetido ao Curso de Graduação em Economia, da Faculdade de Ciências Econômicas da UFRGS. Porto Alegre, RS. 2010.

HUKARI, S.; HERMANN, L.; NÄTTORP, A. **From wastewater to fertilisers - Technical overview and critical review of European legislation governing phosphorus recycling.** Science of the Total Environment; 542, 1127–1135. 2016.

KABBE, C. **Sustainable sewage sludge management fostering phosphorus recovery.** Bluefacts, wvgw, 2013, Report, pp. 36-41.

KATAKI, S.; WEST, H.; CLARKE, M.; BARUAH, D. C. **Phosphorus recovery as struvite from farm, municipal and industrial waste: Feedstock suitability, methods and pre-treatments.** Waste Management, v. 49, p. 437-454, 2016.

MAAß, O.; GRUNDMANN, P.; POLACH, C. B. **Added-value from innovative value chains by establishing nutrient cycles via struvite.** Resources, Conservation and Recycling; 87,126–136. 2014.

MARINS, F. N. **A Firma Penrosiana em um Ambiente de Inovações Tecnológicas.** Monografia de bacharelado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Instituto de Economia. Rio de Janeiro, RJ. 2010.

METCALF, E. (1819). Inc. (2003), Wastewater engineering treatment and reuse.

METCALF, L.; EDDY, H. P. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos.** McGraw Hill Brasil, 2016.

MONTAG, D. **Phosphorus Recovery in Wastewater Treatment Development of a Procedure for Integration into Municipal Wastewater Treatment Plants.** Tese de Doutorado. Dissertation from der RheinischWestfälischenTechnischenHochschule Aachen, 2008. Available from: <http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv>.

MOTA F. S. B.; von SPERLING M. **Nutrientes de esgoto sanitário: utilização e remoção.** Rio de Janeiro: ABES, 2009. ISBN: 978-85-7022-164-3.

MULTIFORM HARVEST. Disponível em: <<http://www.multiformharvest.com/>> Acesso em: fev.2018. [Online].

NIEMINEM J. **Phosphorus recovery and recycling from municipal wastewater sludge.** Master of Science thesis. Aalto University, School of Science and Technology, 2010.

NOVOTNY, V. **Water and Energy Link in the Cities of the Future – Achieving Net Zero Carbon and Pollution Emissions Footprint.** V. Lazarova, K.H. Choo, and P. Cornel - Water/Energy Interactions of Water Reuse, IWA Publishing, London Chapter 3. 2012.

OYAMA, C. **Nutrientes da urina humana como fertilizante agrícola: análise de viabilidade econômica sobre um modelo de produção baseado na Economia Solidária e na Agricultura Familiar.** Dissertação de mestrado. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. São Paulo. 2013.

PAQUES. Disponível em: <https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjluCZ9ILaAhWEGJAKHZHRA9EQFggzMAE&url=https%3A%2F%2Fen.paques.nl%2Fmediadepot%2F4124db800971%2FWEBbrochurePHOSP AQ.pdf&usg=AOvVaw1wNL_NtkG-Mo8hzZwhRWfx> Acesso em: fev.2018. [Online].

PETZET, S.; P. CORNEL. **Phosphorus Recovery from Wastewater.** R. E. Hester & R. M. Harrison (eds.), Waste as a Resource. Royal Society of Chemistry. 2013.

ROYAL HOSKONINGDHV. <<https://www.royalhaskoningdhv.com/en/crystalactor/applications/phosphate-recover>>. Acesso em: fev.2018. [Online].

SARTORIUS, C.; HORN, J. VON; TETTENBORN, F. **Phosphorus recovery from wastewater. Expert survey on present use and future potential.** Water Environmental Research; 84, 313-323. 2012.

SHU, L.; SCHNEIDER, P.; JEGATHEESAN, V., JOHNSON, J. **An economic evaluation of phosphorus recovery as struvite from digester supernatant.** Bioresource Technology 97, 2211–2216. 2006.

THE CHEMICAL ENGINEER (TCE). 2014. Phosphorus: time to act. Disponível em: <www.tcetoday.com>. Fev. 2014.

THE SOURCE MAGAZINE (TSM). Disponível em: <<https://www.thesourcemagazine.org/ostaras-circular-approach-to-phosphorus-recovery/>>. Acesso em: fev.2018.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). (2008). **Municipal nutrient removal technologies reference document. Vol. 1: Technical report.** <<http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=P100GE8B.txt>> Acesso em: mar.2018. [Online].

URDALEN, I. **Phosphorus recovery from municipal wastewater.** Literature Review. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim: 2013.

VAL DEL RÍO, A.; GÓMEZ, J. L. C.; CORRAL, A. M. **Technologies for the Treatment and Recovery of Nutrients from Industrial Wastewater.** IGI Global, 2017.ISBN: 9781522510383.

VANEECKHAUTE, C.; LEBUF, V.; MICHELS, E.; BELIA, E.; VANROLLEGHEM, P. A.; TACK, F. M. G.; MEERS, E. **Nutrient Recovery from Digestate:** Systematic Technology Review and Product Classification. Waste and Biomass Valorization, 2016.

6 CAPÍTULO 2 – ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DE PROJETOS E CONDIÇÕES COMERCIAIS PARA O DESENVOLVIMENTO DO MERCADO DE ESTRUVITA RECUPERADA A PARTIR DO TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS NO BRASIL

Empreendedores por todo o mundo têm encontrado oportunidades de negócios pautados nos conceitos de Nexus e Economia Circular, e essa tendência também tem sido vista no mercado de fertilizantes. Empresas públicas e privadas em diversas partes do planeta estão em uma corrida tecnológica para desenvolvimento de tecnologias para recuperação de estruvita a partir do tratamento de efluentes. Observa-se em muitos países o crescimento do mercado de nutrientes reciclados, especialmente de estruvita, como uma fonte alternativa à rocha fosfática que já se encontra em processo de escassez. Essa nova tendência tem sido seguida por muitas empresas, que saltam na frente no desenvolvimento e estabelecimento de suas tecnologias e marcas, criando vantagem competitiva.

No capítulo 1 deste trabalho foram detalhados os possíveis arranjos tecnológicos para recuperação de estruvita a partir do tratamento de águas residuárias. Concluiu-se que há viabilidade técnica para esse tipo de prática, a partir da realização do levantamento de diversas empresas oferecendo suas tecnologias para este fim no mercado mundial. No Brasil esse mercado ainda não é explorado, e não se sabe ao certo as razões, já que muitas empresas nacionais possuem capacidade técnica e financeira para desenvolver tecnologias próprias e explorar esse mercado. Também não foram encontradas empresas locais ofertando (representando) tecnologias estrangeiras para explorar o mercado de estruvita.

Sendo assim, acredita-se que a razão pelo qual não existem grandes projetos para recuperação e comercialização de estruvita no país está diretamente relacionada às grandes empresas concessionárias dos serviços de saneamento, devido a uma ou mais das seguintes opções: (a) desinteresse por não julgarem necessário utilizar esse tipo de tecnologia; (b) inviabilidade comercial ou econômica para esse tipo de investimento no Brasil; (c) incertezas a respeito da regulamentação relacionada a esse tipo de projeto.

A análise de viabilidade econômica de projetos relacionados à recuperação de estruvita está diretamente relacionada a viabilidade comercial. Sem a comercialização da estruvita como um fertilizante não há sentido recuperá-la.

Para investigar o potencial de desenvolvimento do mercado de estruvita como fertilizante no Brasil é necessário primeiramente estabelecer quem são os potenciais produtores de estruvita no país, que seriam os segmentos-alvo (*target*) das empresas que vendem esse tipo de tecnologia. Também deve-se mapear o mercado em busca de potenciais compradores/consumidores da estruvita recuperada, analisando se é possível obter receitas com a venda desse produto. Em seguida é necessário estabelecer quais as condições para a realização de estudos de viabilidade econômica para esse tipo de projeto, as ferramentas adequadas e as variáveis que devem ser consideradas, para que investidores consigam avaliar caso a caso.

Sendo assim, o objetivo desse capítulo é:

Discutir algumas condições comerciais para desenvolvimento do mercado de estruvita recuperada a partir do tratamento de águas residuárias no Brasil, assim como estabelecer os critérios para elaboração de estudos de viabilidade econômica de projetos voltados para a recuperação e reciclagem deste produto.

O capítulo encontra-se estruturado nos seguintes tópicos:

- Potenciais produtores e compradores de estruvita.
- Ferramentas para elaboração de estudos de viabilidade econômica de projetos de implantação de tecnologias para recuperação de estruvita.
- Desenvolvimento de cenário.

Esse capítulo pretende contribuir com uma análise das condições comerciais para desenvolvimento do mercado de estruvita como fertilizante no Brasil. De maneira complementar, estabelece quais são as principais ferramentas e as principais variáveis que devem ser utilizadas em estudos de viabilidade econômica em projetos de investimento em tecnologias para recuperação e reciclagem de estruvita a partir do tratamento de águas residuárias.

6.1 Potenciais produtores e compradores de estruvita

Para o desenvolvimento de um mercado específico é necessário que exista oferta e demanda de um produto ou serviço. Sendo assim, para analisar a produção e a venda de estruvita no Brasil é necessário realizar um levantamento dos potenciais produtores de estruvita no Brasil (público-alvo das empresas que vendem as tecnologias de precipitação de estruvita), e dos potenciais compradores (clientes dos produtores de estruvita). Os principais atores que compõem esse mercado estão relacionados na Figura 30:

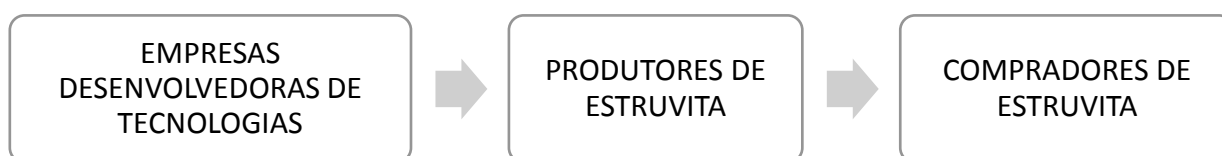


Figura 32 - Relação entre empresas desenvolvedoras de tecnologias, produtores e compradores de estruvita.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Os chamados “produtores de estruvita” são o foco no qual as empresas que comercializam tecnologias para recuperação de estruvita procuram se centrar. De uma maneira geral, eles são os operadores de sistemas de tratamento de águas residuárias, de onde será recuperada a estruvita. Entretanto dentro do grupo de produtores de estruvita existem diversos subgrupos, e os vendedores de tecnologia precisam entender cada um deles para qual ou quais será(ão) o seu público-alvo (ou *target*).

6.2 Potenciais clientes no setor privado

As estações de tratamento de águas residuárias podem ser classificadas como públicas (gerenciadas por Companhias de Saneamento, Autarquias Municipais - SAAEs ou Parcerias Público Privadas (PPPs)) e privadas (de posse de pessoas jurídicas de direito privado). As ETARs (estações de tratamento de águas residuárias) privadas podem ser classificadas como de pequeno, médio ou grande porte. As de pequeno porte são encontradas geralmente em condomínios, hospitais, escolas, empresas ou granjas de criação de animais, e quase sempre são instaladas devido à inexistência de rede de coleta de esgoto. As ETARs de médio e grande porte

pertencem geralmente a grandes indústrias, ou são gerenciadas por Concessionárias de Água e Esgoto privadas. Segundo a classificação da SANEPAR (2017), as ETARs de pequeno porte têm vazão de até 60L/s, as de médio porte de 60 a 200L/s, e as de grande porte acima de 200L/s.

A grande maioria de empresas que atuam no ramo de venda de tecnologias para cristalização de estruvita focam em ETARs de grande porte, para que haja economia de escala e seja mais simples demonstrar a viabilidade econômica do projeto ao investidor. Esse tipo de cliente é também o que enfrenta maiores problemas relacionados a incrustações e problemas em equipamentos eletromecânicos devido à precipitação espontânea de estruvita. Neste caso, os clientes privados estão limitados às grandes indústrias e concessionárias de água e esgoto privadas do país, grandes tratadoras de águas residuárias. Em geral esse tipo de tecnologia com potencial de redução de custos é bem visto por esse tipo de cliente, que também procura por selos verdes para destacar em seus programas ambientais. O reúso de água e geração de energia elétrica pelo aproveitamento de biogás são iniciativas que cada vez mais vêm sendo implantadas em grandes estações pelo país.

Com relação às concessionárias de água e esgoto privadas, o Atlas Esgotos, Despoluição de Bacias Hidrográficas (ANA, 2017) traz a informação que atualmente são apenas 25, e que atendem a 101 municípios no país, correspondendo a 12,8 milhões de habitantes (Figura 31). Esse número corresponde a aproximadamente 10% do total da população atendida por Concessionárias Estaduais, mas a tendência é que aumente com o passar dos anos. De acordo com Castro (2017), nos últimos três anos, os investimentos da iniciativa privada no saneamento giraram em torno de 20% do total investido no setor, apesar de a presença do capital privado estar restrita a 5% dos municípios e 15% da população. Ou seja, mesmo com menor fatia de participação no setor, o segmento privado possui parcela significativa nos investimentos.

Ainda há bastante espaço para ampliar a presença das empresas privadas na prestação do serviço público de saneamento pelas Parcerias Público-Privadas (PPPs) previstas na Lei nº11.079/2004. A urgência dessa mudança se deve principalmente à incapacidade dos municípios, governos e concessionárias estaduais de prestar bons serviços à população, refletidos no baixíssimo percentual de atendimento de

esgotamento sanitário no país no qual apenas 55% possui descarte adequado (ANA, 2017).



Figura 33 - População atendida por companhias estaduais, autarquias e prefeituras, e concessionárias privadas.

Fonte: Agência Nacional de Águas (2017).

No setor privado, outra opção é pelas atividades ligadas à agropecuária, responsáveis pela geração de 34% dos efluentes líquidos (Rahaman et al., 2014). A pecuária é uma atividade do agronegócio ligada a criação de animais para algum tipo de comercialização, podendo ser, por exemplo, a produção de carne, leites, ovos, etc. O efluente gerado por esse tipo de atividade tem como característica altas cargas de nutrientes, ainda mais se comparado ao esgoto doméstico (Quadro 11).

Tipo de efluente	Fósforo Total (mg/L)	Nitrogênio Total (mg/L)	Fonte
Esgoto sanitário doméstico	8	47,5	MOTA; VON SPERLING (2009)
Frigorífico bovino	71,5	71,7	AGUILAR et al. (2002)
Suinocultura	636	2155	RODRIGUES (2008)
Suinocultura (efluente antes do gradeamento)	850	2175	KRUGER et al. (1995) apud MÜNCH; BARR (2001)
Avicultura	370	1580	BURNS et al. (2001) apud KATAKI et al. (2016)

Quadro 11 - Concentração de nutrientes em diferentes efluentes.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Sendo assim, ofertar tecnologias que permitem a recuperação de estruvita para esse tipo de indústria pode, também, ser bastante interessante do ponto de vista econômico já que grande quantidade de estruvita pode ser produzida.

6.3 Potenciais clientes no setor público

No Brasil, alcançar os clientes do setor público é uma tarefa bastante complexa. Se por um lado o setor privado é atraído por iniciativas que possibilitam a redução de custos, o setor público tem como característica a lentidão e resistência à implantação de novas tecnologias. O modelo de regulação por preço utilizado para o saneamento básico pode ser considerado rígido, antigo e dificulta a entrada de novas tecnologias. Além disso, há pouco incentivo à eficiência, pois os lucros são garantidos a níveis aceitáveis pela Lei Federal 11.445/2007, artigo 29, Inciso I:

Art. 29. Os serviços públicos de saneamento básico terão a sustentabilidade econômico-financeira assegurada, sempre que possível, mediante remuneração pela cobrança dos serviços:

I - de abastecimento de água e esgotamento sanitário: preferencialmente na forma de tarifas e outros preços públicos, que poderão ser estabelecidos para cada um dos serviços ou para ambos conjuntamente; (BRASIL, 2007).

A Associação Brasileira das Concessionárias Privadas de Serviços Públicos de Água e Esgoto – ABCON, enfatiza que apesar da importância da criação da Lei 11.445/2007, o setor de saneamento pouco evoluiu nos últimos 10 anos (CASTRO, 2017). A Associação elenca algumas razões que contribuem com o atual quadro, como, por exemplo, a criação da Lei 11.107/05, que regulamentou os Consórcios Públicos. Esta lei liberou os Contratos de Programa (parceria público–pública) entre municípios e empresas estaduais, o que fragilizou a competitividade do segmento privado, para o qual a legislação obriga os processos licitatórios.

Em resumo, atualmente a maior parte do setor de saneamento encontra-se sob gestão do poder público, o que limita muito o leque de grandes clientes de empresas que pretendem atuar no mercado de tecnologias para precipitação de estruvita. Sem mudanças regulatórias e na legislação vigente, exigindo parâmetros de lançamento mais rigorosos e reciclagem de nutrientes, dificilmente o setor público investirá em tecnologias desse tipo.

6.4 Potenciais clientes para compra da estruvita

Convercer uma empresa a investir em uma tecnologia para precipitação de estruvita sem demonstrar que existe um mercado potencial para venda desse produto é um grande desafio para alavancar a comercialização de estruvita.

Por isso, muitas empresas que vendem tecnologias de recuperação de estruvita possuem contratos pré-estabelecidos para fornecimento de toda a produção de estruvita a preços pré determinados, em geral para indústrias de fertilizantes. É mais interessante que a venda do produto seja feita por esse tipo de indústria, especializada em vendas por atacado e com grande capilaridade de distribuição. Além disso, o poder de convencimento é maior ao se garantir para o cliente que há uma receita assegurada com a venda da estruvita produzida, evitando-se que a empresa compradora da tecnologia se desgaste com uma atividade que não é sua atividade fim.

Conforme o descrito anteriormente, a estruvita é considerada um fertilizante de liberação lenta e tem como mercado potencial as indústrias relacionadas à jardinagem, indústrias produtoras de alimentos naturais e orgânicos, além de interessados em um produto ecologicamente correto. Segundo Metcalf e Eddy (2016), devido ao elevado custo de produção, os fertilizantes de liberação lenta têm sido utilizados, predominantemente, em aplicações com alto valor agregado, como viveiro de plantas, estufas para produção de flores e campos de golfe. Mayer et al. (2016), acrescentam que a estruvita tem sido comercializada como uma mercadoria *Premium* (de qualidade superior), uma vez que há uma disposição maior do que o habitual para pagar por um produto de alto valor agregado neste mercado. Na atualidade, a estruvita está disponível nos EUA em uma mistura com fosfato de magnésio e potássio, com nomes comerciais de MagAmp ou MagAmp^R-K, com composição de 7% de N, 40% de P₂O₅, 6% de K₂O e 12% de Mg. A empresa de fertilizantes que adquirir a estruvita possivelmente misturará com outros produtos químicos para a obtenção de um produto com a quantidade de nutrientes exigidas.

No caso das granjas que possuem suas próprias ETARs, a estruvita produzida pode ser utilizada em plantios próprios ou de propriedades vizinhas, substituindo uma parcela de fertilizantes minerais.

Um promissor mercado para fertilizantes contendo fósforo reciclado (por exemplo estruvita) é o da agricultura orgânica, que encontra-se em processo de rápida expansão. Na Europa, por exemplo, a agricultura orgânica já representa um total de 6,2% da área agrícola total utilizada, tendo como adeptos quase 185.000 fazendas em todo o continente (EUROPEAN COMMISSION, 2016). As disposições gerais considerando a produção, distribuição, controle e rotulagem da agricultura biológica são encontradas no Regulamento (CE) 834/2007, e, os produtos (incluindo

fertilizantes) que são permitidos na agricultura biológica estão listados no Regulamento (CE) 889/2008. Dados do SEBRAE (2017) indicam que o Brasil também está se consolidando como um grande produtor e exportador de alimentos orgânicos. Mais de quinze mil propriedades já encontram-se certificadas e em processo de transição, sendo 75% pertencentes a agricultores familiares.

De acordo com Hukari, Hermann e Nättorp (2016), a única fonte mineral de fósforo atualmente aceita para uso neste tipo de cultura é a rocha fosfática, e somente em casos excepcionais recursos químicos e sintéticos são permitidos como fonte de nutrientes. No entanto, pesa a favor dos fertilizantes contendo fósforo reciclado o fato de que na maioria dos casos obedecem a algumas regras essenciais para a agricultura orgânica, pois permitem o fechamento do ciclo de nutrientes. Além disso, os autores destacam como característica positiva para esse tipo de agricultura o fato de que esses fertilizantes representam uma fonte renovável e normalmente não são solúveis em água. Essas são características que vão ao encontro do objetivo geral da agricultura orgânica, que é o desenvolvimento em ciclos fechados com o uso preferencial de recursos internos.

É importante ressaltar que muitos autores acreditam que dificilmente se tenha retorno do investimento (payback) nesse tipo de projeto somente pela recuperação e comercialização da estruvita (MAYER et al. 2016; MOLINOS-SENANTE et al., 2011, KABBE, 2014). No caso da empresa Ostara, que está operacional no Canadá, EUA e Europa, o modelo de negócio é baseado no serviço de remoção de fósforo ao invés de venda e reutilização do produto chamado Crystal Green (MAYER et al. 2016). Ou seja, apresenta-se a tecnologia como uma maneira de melhorar a remoção de fósforo das ETARs, sendo a estruvita apenas um subproduto complementar. Os autores acrescentam que isso acontece principalmente devido aos baixos valores de mercado da tonelada de rocha fosfática, o que dificulta a comercialização de fontes alternativas de fósforo.

Não obstante, não existe consenso sobre esse assunto pois muitos pesquisadores entendem que investimentos nesse tipo de tecnologias são interessantes do ponto de vista financeiro e econômico (METCALF; EDDY, 2016; DESMIDT et al., 2015). Sendo assim, será discutido quais são as principais ferramentas para realização de estudos de viabilidade econômica de projetos para implantação de tecnologias para recuperação de estruvita.

6.5 Ferramentas para elaboração de estudos de viabilidade econômica de projetos de implantação de tecnologias para recuperação de estruvita

Apesar de muitas ETARs por todo o planeta já possuírem tecnologias para precipitação de estruvita, ainda existem muitas dúvidas quanto a viabilidade econômica desse tipo de projeto. Sem exigências e incentivos regulatórios para recuperação de nutrientes em águas residuárias (especialmente o fósforo), a viabilidade econômica de projetos para instalação desse tipo de tecnologia torna-se condição “*sine qua non*” para que passem a ser amplamente adotadas tornando-se praticamente indispensável no tratamento de efluentes. Contudo, como discutido no capítulo 1 deste trabalho, são muitas as tecnologias disponíveis no mercado para recuperação da estruvita, e todas elas com características diferentes que impactam nos resultados de estudos de viabilidade econômica desse tipo de investimento.

A escolha da tecnologia que será implantada para recuperação de estruvita deve ser realizada criteriosamente pelo cliente, que deve avaliar o que deseja obter como resultado. Diversas variáveis devem ser consideradas para se chegar ao projeto ótimo de viabilidade econômica, como, por exemplo, as características do efluente em questão, qualidade esperada da estruvita, valor disponível para se investir, quantidade de insumos e energia que pretende consumir, etc.

Quando há mais de uma opção de projeto e eles são excludentes, é importante utilizar ferramentas de análise de viabilidade econômica para auxiliar na tomada de decisão. De acordo com Puchongkawarin et al. (2015), uma das maneiras de se avaliar a viabilidade econômica desse tipo de investimento, onde há a recuperação e possibilidade de comercialização de algum insumo, é calcular o seu valor presente líquido (VPL) ao longo da vida útil do projeto. A Equação 1 representa a fórmula do VPL adaptada pelos autores para esse tipo de investimento:

$$VPL = -CAPEX + \sum_{yr=1}^{\text{tempo de vida}} \frac{VENDAS - OPEX}{(1 + TAXAS DE DESCONTO)^{yr}} \quad (1)$$

Onde:

- CAPEX representa o investimento (“CAPital EXpenditure”).
- VENDAS representa as receitas obtidas com as vendas de produtos.
- OPEX representa as despesas operacionais (“OPerational EXpenditure”).
- TAXAS DE DESCONTO utilizada para trazer valores para Valor Presente.

No atual cenário, definir a variável “vendas” talvez seja a tarefa mais desafiadora, visto que não existe preço definido para o produto estruvita. Apesar de um produto com 5,7% de N, 29% de P_2O_5 e 16% de Mg ter valor elevado, a estruvita não possui um produto similar ou equivalente no mercado atual, não tendo, assim, um valor de mercado definido (NYSERDA, 2006 apud CASTRO, 2014). A estruvita é um fertilizante relativamente novo, desconhecido pela maioria das empresas de comércio e mistura de fertilizantes e pelos potenciais usuários finais (DE VRIES et al., 2017).

Outra maneira de se estimar o valor de mercado da estruvita é realizando comparações com outros fertilizantes. O conteúdo de fósforo na estruvita é menor que o dos fertilizantes Triplo Superfosfato (TSP), Mono-amônio-fosfato (MAP) e Fosfato Diamônio (DAP), e um pouco maior que o Superfosfato Simples (SSP). É importante destacar que apesar de ser definida como um fertilizante fosfatado, a estruvita contém um pouco de N (5%) e MgO (16%), o que aumenta seu valor de mercado como fertilizante. A concentração de nutrientes nos principais fertilizantes é apresentada no Quadro 12:

Fertilizantes fosfatados	Abrev	Fórmula	N	P_2O_5	K_2O	CaO	MgO	SO_3
Mono-amônio-fosfato	MAP	$NH_4H_2PO_4$	12	54	0	0	0	0
Fosfato Diamônio	DAP	$(NH_4)_2HPO_4$	18	46	0	0	0.8	3.8
Superfosfato Simples	SSP	$Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$ + $CaSO_4$	0	20	0	34	0	31
Triplo Superfosfato	TSP	$Ca(H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$	0	45	0	24	0	4.5
Estruvita		$MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$	5.7	28.9	0	0	16	0
Rocha fosfática		-	-	36	-	-	-	-

Quadro 12 - Comparação de fertilizantes populares com a estruvita.

Fonte: Adaptado de De Vries et al. (2017).

Para estimar um preço de mercado para a estruvita, De Vries et al. (2017) realizaram uma comparação com o fertilizante DAP, relacionando o seu valor de mercado com a quantidade de nutrientes oferecidas em cada um deles. Optou-se por comparar com o DAP pois é um adubo fosfatado bem difundido e, de acordo com os autores, é o que possui mais informações e estatísticas disponíveis. Para elaboração da Equação 2, os autores utilizaram os preços de DAP como referência para os preços de P_2O_5 , com

base em seu conteúdo de P_2O_5 (apenas 46%). No entanto, o DAP também contém 18% de N, o que provavelmente contribui para o seu valor de mercado, e esta diferença em relação ao conteúdo da estruvita (5,7%) deve ser considerada. Para corrigir essa diferença, os autores descontaram os preços de DAP com 12,3% do valor de N. O valor de N foi estimado pelos autores a partir dos preços de ureia do mercado mundial (www.indexmundi.com) e do conteúdo de N (46%). A estratégia dos autores resume-se à seguinte fórmula:

$$PDAP, \text{ corrigido} = (Pr_{DAP} - (N_{DAP} - N_{estruvita}) (Pr_{urea} / N_{urea})) / P_{2O_5 \text{ estruvita}} \quad (2)$$

Onde:

- $Pr_{DAP, \text{ corrigido}}$ Preço do DAP, corrigido pelo conteúdo de N e P_2O_5 por tonelada, para permitir uma comparação direta com o preço da estruvita (US\$ Ton⁻¹);
- Pr_{DAP} Preço de Mercado do DAP (US\$ Ton⁻¹);
- N_{DAP} Conteúdo de N em DAP (18%);
- $N_{estruvita}$ Conteúdo de N em estruvita (5,7%);
- Pr_{urea} Preço de Mercado da ureia (US\$ Ton⁻¹);
- N_{urea} Conteúdo de N em ureia (46%);
- $P_{2O_5 \text{ estruvita}}$ Conteúdo de P_2O_5 em DAP (46%)

Além do preço de mercado estimado pela Fórmula 2, Bird (2015) acrescenta que a estruvita é ainda mais valiosa pois pesquisas sugerem que apresentam um desempenho superior ao fertilizante DAP quando aplicado nas mesmas condições. Experiências demonstraram que uma aplicação de fertilizantes de 36mg de estruvita/kg resultou em um crescimento equivalente de biomassa vegetal equivalente a uma aplicação de 42mg DAP/kg (BARAK e STAFFORD, 2006 apud BIRD, 2015). Neste estudo os autores concluíram que a taxa de eficiência da estruvita é 117% superior em comparação com o fertilizante DAP.

Sikosana, Randall e von Blottnitz (2017) realizaram um estudo comparando dois tipos de tecnologias (Ostara e a Multiform Harvest) para cristalização de estruvita a partir das correntes secundárias das ETARs. Um cenário foi elaborado comparando características e desempenho das duas tecnologias caso fossem instaladas na maior ETE da Cidade de Capetown - África do Sul, e foi calculado o Valor Presente Líquido (VPL) das duas opções para avaliar qual das duas opções é economicamente mais interessante. A principal diferença entre as duas tecnologias é que a Ostara produz estruvita de alta qualidade (o efluente é recirculado várias vezes), enquanto a Multiform Harvest produz uma estruvita de baixa qualidade (não há recirculação do

efluente e o tempo de detenção é reduzido). Os autores explicam que, de maneira geral, a Multiform Harvest gera um produto menos refinado para o mercado. Por fim os autores realizaram uma análise de sensibilidade, modificando as variáveis para destacar qual delas tem mais impacto para a análise do investimento.

Algumas diferenças entre as tecnologias que impactam nas variáveis do estudo são:

- O leito fluidizado cônico da Multiform Harvest é menor que as instalações da Ostara, o que impacta no CAPEX.
- A Multiform Harvest não promove as etapas de “secagem” e embalagem da estruvita, o que reduz muito os custos de operação.
- O processo utilizado para produzir uma estruvita de alta qualidade necessita de uma quantidade de energia elétrica muito maior, além de impactar na Análise de Ciclo de Vida do produto.

De maneira resumida, os resultados encontrados pelos autores foram:

- Apesar de ser um produto de alto valor de mercado (estruvita), se a concentração de nutrientes na água residuária for baixa, a produção de estruvita de alta qualidade não gerará receitas suficientes para recuperar o investimento.
- Os altos custos envolvidos no processamento e embalagem da estruvita tornam essa prática inviável do ponto de vista financeiro (no caso da Ostara).
- O CAPEX encontrado para a estruvita de alta qualidade foi de 76,5 milhões de Rand (moeda sul africana), e para a estruvita de baixa qualidade foi de 20,6 milhões de Rand. Conclui-se que o investimento inicial na tecnologia da Multiform Harvest é aproximadamente quatro vezes menor
- O OPEX anual da estruvita de alta qualidade foi de 3,97 milhões de Rand por ano, sendo que o da estruvita de baixa qualidade foi de 1,51 milhões.
- O retorno obtido com a venda da estruvita produzida foi de 315.000 Rand para a estruvita de alta qualidade, e de 63.300 para a de baixa qualidade.
- Após análise de sensibilidade das variáveis, os autores concluíram que o CAPEX é a que tem maior impacto no cálculo do VPL nas duas opções.
- A opção pela produção de estruvita de baixa qualidade pode ter retorno do investimento em 19 anos (condicionado ao aumento do valor do kilograma da estruvita).

Apesar de reunir informações importantes a respeito da avaliação da viabilidade econômica de tecnologias para recuperação de nutrientes a partir do tratamento de esgoto, o trabalho de Sikosana, Randall e von Blottnitz (2017) não considera (ou ao menos não foram descritas) variáveis importantes para o estudo, relacionadas à economia (ou despesas evitadas) resultantes da implantação da tecnologia, considerando como receita apenas o valor de venda da estruvita produzida.

O impacto das variáveis ignoradas pelos autores fica claro no trabalho de Maaß, Grundmann e Polach (2014), que realizaram um estudo de viabilidade econômica da implantação da tecnologia Airprex® para precipitação de estruvita na ETE Wabmandorf – Alemanha. Os resultados encontrados são de que a ETE teve uma economia de 416.000,00 euros por ano, sendo que 51% desse valor é resultado da diminuição de uso de floculantes devido à instalação do Airprex®. As outras economias estão relacionadas à: redução do volume de lodo (39%), redução da manutenção das centrífugas (4%), redução dos custos de limpeza (3%), prevenção das incrustações na tubulação do lodo (2%) e redução do consumo de energia elétrica (1%). De acordo com os autores, as receitas provenientes da venda de estruvita foram relativamente baixas em comparação com as reduções de custos alcançadas no processo de tratamento de águas residuárias, representando apenas cerca de 4% dos benefícios totais conforme demonstrado na Figura 32.

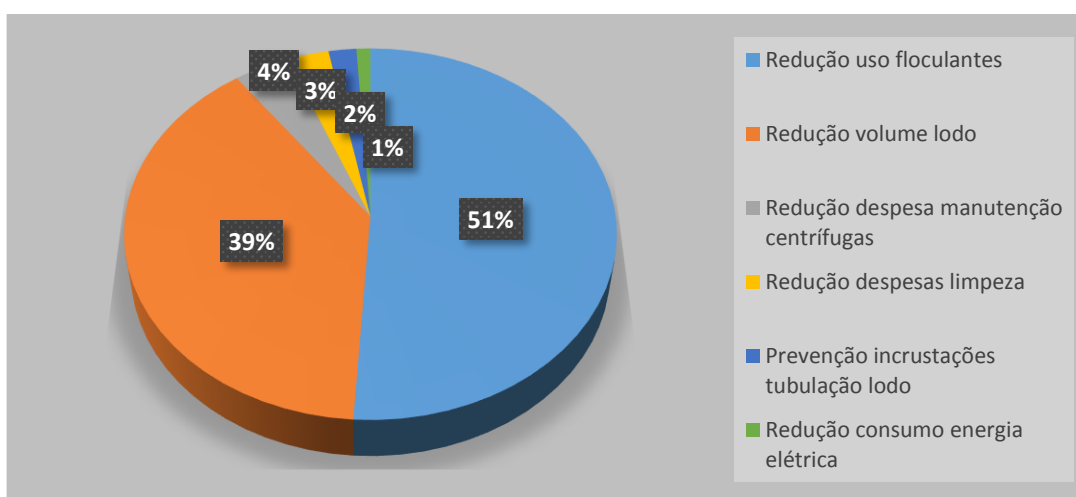


Figura 34 - Benefícios ocasionados pela utilização da tecnologia de recuperação de estruvita.

Fonte: Adaptado de Maaß, Grundmann e Polach (2014).

Molinos-Senante et al. (2011) aprofundam um pouco mais a discussão sobre o tema ao acrescentar que as análises de viabilidade econômica para esse tipo de projeto devem considerar não apenas os impactos internos (diretamente ligados ao projeto), mas também os impactos externos relacionados aos benefícios ambientais gerados. Ao contrário dos impactos internos, devido à ausência de preços de mercado são necessários métodos de avaliação econômica para a quantificação de externalidades. Os autores sugerem o uso do conceito de função de distância direcional para cálculo de um preço sombra para esses bens decorrentes de atividades humanas e produtivas que não possuem valor de mercado e impactos ambientais substanciais. Um estudo de viabilidade econômica da recuperação de fósforo é elaborado pelos autores usando uma metodologia de análise econômica convencional, a saber, análise custo-benefício (ACB). O lucro líquido é a diferença entre benefícios e custos (Equação 3).

$$NP = BI + BE \quad (3)$$

Onde,

- NP é o lucro líquido (renda total - custos totais) (R\$);
- BI é o benefício interno (renda interna - custos internos) (R\$); e
- BE é o benefício externo (externalidades positivas - externalidades negativas) (R\$);
-

A ACB parte da premissa de que um projeto só é economicamente viável se todos os benefícios excederem os custos agregados, ou seja, de acordo com a Eq. 1, se o $NP > 0$.

Segundo os autores, o termo renda interna inclui o rendimento obtido como resultado da venda de estruvita recuperada, bem como economias de: (i) redução dos custos operacionais da ETE, uma vez que existe uma redução nos reagentes necessários para a precipitação química do fósforo; (ii) redução da produção de lodo e conseqüentemente menores custos associados à sua gestão; e (iii) redução da limpeza de tubos porque há menos formação de estruvita descontrolada. A fórmula para cálculo dos benefícios internos elaborada pelos autores é apresentada na Equação 4:

$$B_I = \sum_{t=0}^T \left[(APR_t \times SPP_t) + (ASR_t \times CSM_t) + (ARR_t \times CR_t) \right] + (ADR_t \times CCD_t) - (IC_t + OMC_t + FC_t) \quad (4)$$

Onde,

- BI = benefício interno (€);
- APR = volume anual de fósforo recuperado (kg);
- SPPt = preço de venda atual do fósforo recuperado (€ kg⁻¹);
- ASR = volume anual de redução da geração de lodo (kg);
- CSMt = custo atual da gestão das lamas (€ kg⁻¹);
- ARR = redução anual de volume de reagentes (kg);
- CRt = custo atual dos reagentes (€ kg⁻¹);
- ADR = redução anual de volume do depósito de fósforo não controlado (kg);
- CCDt = custo atual da limpeza do depósito de fósforo (€ kg⁻¹);
- IC = custo de investimento (€);
- OMct = custo operacional e de manutenção atual (€);
- FCt = custo financeiro atual (€)
- t = ano.

As externalidades referem-se a qualquer consequência (positiva ou negativa, intencional ou aleatória) que decorre de um projeto e efeitos sobre pessoas sem compensação econômica. A fórmula para cálculo dos benefícios externos é apresentada na Equação 5:

$$BE = \sum_{t=0}^T (EP_t - EN_t) \quad (5)$$

Onde,

- BE = valor presente do benefício externo (€);
- EP = valor presente das externalidades positivas (€);
- EN = valor presente das externalidades negativas (€); e
- t = ano.

Assim como os benefícios internos, as externalidades positivas e negativas devem ser expressas em valor presente. Embora os benefícios internos possam ser calculados diretamente em unidades monetárias, a quantificação dos impactos externos, devido à ausência de preços de mercado, requer o uso de métodos de avaliação econômica. Por esta razão, a estimativa de impactos externos é o principal obstáculo ao determinar a viabilidade econômica de um projeto de recuperação de fósforo.

Neste caso surge um problema não-linear, e para resolvê-lo os autores utilizaram um software chamado GAMS. Os resultados encontrados indicam que o valor médio do preço sombra do fósforo é -42,74 € kg⁻¹, o que significa que, para cada kg de fósforo

que não é despejado no meio ambiente, o dano evitado ou o benefício ambiental gerado é igual a € 42,74.

Os autores ainda concluem seu trabalho destacando que, se não forem considerados os benefícios externos, dificilmente projetos para implantação de tecnologias para precipitação de estruvita serão economicamente viáveis.

Qualquer ferramenta de análise de viabilidade econômica de projeto que for utilizada necessita do detalhamento das economias/despesas ou variáveis positivas/negativas que impactarão no projeto. Desconsiderando as estimativa de impactos externos que necessitam de softwares para quantificação, as informações principais das variáveis relacionadas às instalações de tecnologias para recuperação de estruvita que devem ser levantadas são apresentadas no Quadro 13 :

Variáveis geradoras de economia (variáveis positivas)	Variáveis geradoras de despesas (variáveis negativas)
Venda da estruvita.	Custos de instalação (CAPEX).
Redução de custos com energia elétrica.	Custos com produtos químicos.
Redução do custos de manutenção da tubulação (entupimento com estruvita).	Custos de OPEX.
Redução dos custos com disposição do lodo.	Depreciação da tecnologia.
Redução do uso de produtos químicos para os processos de remoção de nutrientes.	Energia utilizada para a tecnologia (separa da energia elétrica utilizada pela ETAR).
Redução dos custos de limpeza.	Custos com logística da estruvita (embalagem e transporte – se houver).

Quadro 13 - Variáveis positivas e negativas para estudos de viabilidade econômicas em projetos para recuperação de nutrientes em ETARs.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Acredita-se que projetos relacionados a créditos de carbono também podem ser considerados como variáveis geradoras de economia, no entanto envolvem etapas e investimentos diferentes.

Realizado o levantamento dos potenciais produtores e consumidores de estruvita, e detalhadas as ferramentas e variáveis utilizadas para análise de viabilidade econômica desse tipo de projeto, será elaborado nesta etapa do trabalho um cenário hipotético em que uma empresa brasileira pretende explorar o mercado de estruvita a partir da venda e instalação de tecnologia de recuperação deste produto.

6.6 Desenvolvimento de cenário

No cenário elaborado foi simulada a venda e instalação de tecnologia de recuperação de estruvita por uma empresa brasileira para um cliente de algum dos públicos-alvo possíveis deste mercado, e posteriormente foi elaborado um estudo de viabilidade econômica para avaliação da viabilidade do negócio. Por fim foi feita uma análise de sensibilidade das variáveis para verificar seus impactos nos resultados.

6.6.1 O público-alvo

Diante do exposto até o momento, decidiu-se que, em um primeiro momento, a empresa limitará as opções e se concentrará em um público-alvo bastante específico que é o da suinocultura. Praticamente todas as granjas de criação de porcos possuem suas próprias ETARs, em geral do tipo lagoas, para tratar os efluentes gerados diariamente, e são o ambiente perfeito para a precipitação de estruvita pelas seguintes razões:

- O efluente da suinocultura possui grandes concentrações de fósforo e nitrogênio.
- Em granjas de suínos, uma remoção significativa de fósforo para atender as legislações vigentes só é possível mediante a precipitação de sais insolúveis de fosfato, como, por exemplo, a estruvita (PINTO, 2012).
- De acordo com Munch, Benesovsky-Scott e Barr (2001), a cristalização da estruvita ocorre de maneira espontânea na maioria das ETARs em suinoculturas, mostrando que é extremamente simples produzir estruvita a partir desse tipo de efluente.
- Em muitas granjas o efluente é reutilizado para limpeza das baias antes de ser descartado, o que aumenta ainda mais a concentração de nutrientes no efluente (MUNCH; BENESOVSKY-SCOTT; BARR, 2001).

Além disso, em uma pesquisa de mercado realizada por Munch, Benesovsky-Scott e Barr (2001) com criadores de suínos e experts na área, 70% dos entrevistados responderam que o efluente da criação de porcos é o mais problemático em comparação com outras criações, seguido da avicultura e abatedouros.

De acordo com o IBGE (2012b apud CRUZ; PEREIRA; FIGUEIREDO, 2017), em 2012 o efetivo do rebanho de suínos no país já era de aproximadamente 39 milhões (Tabela

6), e estima-se que naquele ano foram descartados mais de 34,2 milhões de toneladas de P_2O_5 por ano em seus resíduos (Tabela 7) (CRUZ; PEREIRA; FIGUEIREDO, 2017).

Tabela 7 - Rebanho de suínos no Brasil.

	Norte	Nordeste	Sudeste	Sul	Centro-Oeste	Brasil
Suínos	1.489.219	5.857.733	7.131.055	19.212.426	5.199.649	38.795.902
%	3,8	15,1	18,4	49,5	13,4	100,0

Fonte: IBGE (2012b apud CRUZ; PEREIRA; FIGUEIREDO, 2017).

Tabela 8 - Estimativa da quantidade anual de NPK presente em resíduos de suínos.

Fonte do resíduo	Quantidade de nutrientes (mil t/ano)		
	N	P_2O_5	KO_2
Suinocultura	59,1	34,2	32,4

Fonte: CRUZ; PEREIRA; FIGUEIREDO (2017)

O nicho de mercado escolhido será o de granjas de grande porte, com 100 ou mais matrizes (fêmeas criadeiras). De acordo com Bonett e Monticelli (1998), no sul do país as granjas são classificadas da seguinte maneira:

PEQUENO	Produtor com número de matrizes inferior a 21.
MÉDIO	Produtor com número de matrizes entre 21 e 100.
GRANDE	Produtor com mais de 100 matrizes.

Quadro 13 - Classificação de granjas de suínos por porte.

Fonte: Bonett e Monticelli (1998).

Optou-se por focar este estudo nas grandes granjas pois são grandes geradoras de resíduos, sendo potencialmente mais poluidoras e mais visadas pelos órgãos de fiscalização ambiental. Além disso, as grandes vazões de efluente geradas permitem um maior volume de cristalização de estruvita, o que em teoria contribui para payback reduzido. Em geral também possuem maior poder aquisitivo, podendo ser mais facilmente convencidas de investir na tecnologia proposta. Outra vantagem, segundo Westerman, Zering e Rashash (2009), é que por possuírem ETARs em suas criações, a maioria dos fazendeiros (e empregados) já possuem a *expertise* necessária para manejar o cristalizador e recuperar estruvita, sendo necessário apenas uma etapa de treinamento.

A escolha pela suinocultura também se deve ao fato de que provavelmente o fazendeiro possa utilizar a estruvita recuperada em algum tipo de plantação em suas próprias terras ou propriedades vizinhas, reduzindo assim despesas com compra de fertilizantes.

6.6.2 Vazão de água residuária produzida

Para a construção do cenário foram utilizados os cálculos da quantidade de suínos em uma granja de ciclo completo elaborados por Dias et al. (2011). Os autores calcularam que para a produção de 300 cevados por semana uma granja deve ter aproximadamente a seguinte quantidade de porcos:

Matrizes	594
Marrãs	50
Machos	10
Leitões desmamados	314
Recria/terminação	309
Cevados	300
Total	1.577

Quadro 14 - Quantidade média de suínos na granja considerado no cenário
Fonte: Dias et al. (2011)

De acordo com a classificação de Bonett e Monticelli (1998), esta já seria uma granja de grande porte, segmento-alvo da empresa considerada neste estudo.

Segundo Amaral (2006), nos sistemas convencionais de produção todos os dejetos são manejados na forma líquida (dejetos líquidos produzidos pelos animais + perda de água nos bebedouros + água utilizada na limpeza). A Fundação do Meio Ambiente de Santa Catarina (FATMA, 2011, Anexo 7) estabelece que o volume médio de dejetos produzidos por animal/dia em granjas de ciclo completo é de 47,1 litros, enquanto que Dias et al. (2011) estimam que a produção de dejetos de suínos pode variar de 60 a 100 litros por matriz/dia em uma granja de ciclo completo. Para construção desse cenário considerou-se uma produção unitária de 80 litros por matriz dia, o que totaliza um volume de 47,5m³ de dejetos produzidos por dia nesta granja.

6.6.3 Potencial de produção de estruvita

De acordo com Bonett e Monticelli (1998), a concentração média de nutrientes em efluente suíno se dá nos seguintes números: N = 2.374,3 mg/L e P = 577,8 mg/L. Sendo assim, a quantidade de nutrientes descartados ao longo do tempo no efluente da granja considerada neste cenário é apresentado na Tabela 8:

- Carga diária de P = 47,5 (m³/d) x 0,5778 (KgP/m³) = 27,4 Kg/d

- Carga diária de N = $47,5 \text{ (m}^3\text{/d)} \times 2,374 \text{ (KgN/m}^3\text{)} = 112,8 \text{ Kg/d}$

Tabela 8 - Quantidade de nutrientes descartados por dia, mês e ano na granja.

	Kg/dia	Kg/mês	Kg/ano
N	112,8	3.383,3	40.600,5
P	27,4	822	9.864

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

De acordo com Cornel e Schaum (2009), a recuperação de fósforo da fase líquida é limitada a 50-60%, uma vez que o restante do fósforo é removido juntamente com o lodo. Sendo assim, considerou-se o percentual médio de 55% para estimar o potencial de recuperação anual de nutrientes no cenário elaborado, ou seja, 22,3 toneladas de nitrogênio e 5,42 toneladas de fósforo.

De acordo com Rahaman et al. (2014), a massa molecular da estruvita é de 245,43 g mol⁻¹ ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O} = 24 + 14 + 4 \times 1 + 31 + 4 \times 16 + 6 \times 2 \times 1 + 6 \times 16 = 245$). Dividindo-se esta massa molecular pela massa molecular do fósforo (elemento limitante no caso da precipitação de estruvita, por estar presente em menor quantidade na água residuária), tem-se a relação de 7,9g de estruvita para cada g de P. Conclui-se, portanto, que neste cenário é possível se precipitar 42,8 toneladas de estruvita por ano ($5,42\text{t} \times 7,9 = 42,8\text{t}$) no exemplo considerado.

6.6.4 CAPEX e OPEX

Para a definição do CAPEX (Capital Expenditure) desse projeto, foi consultada a empresa Fluir Engenharia Ltda., localizada em Vila Velha/ES, especializada no desenvolvimento de tecnologias de saneamento.

A escolha por essa empresa deve-se ao fato de a mesma ter sido uma das primeiras (talvez a primeira) empresa brasileira e desenvolver seu próprio cristalizador de estruvita, através de um projeto de P,D&I financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Espírito Santo – FAPES (edital de subvenção econômica nº004/2010). Vale ressaltar que não foi possível se identificar uma empresa brasileira atuando neste tipo de mercado no Brasil até a conclusão do presente estudo.

As vazões calculadas foram enviadas para a empresa, para que a mesma apresentasse uma solução tecnológica e uma proposta técnico-comercial. O objetivo dessa etapa foi definir um preço para a tecnologia, e, dessa maneira, estipular o

CAPEX do projeto. Em paralelo algumas informações para que fosse determinado o OPEX (Operational Expenditure) foram solicitadas, como a quantidade e tipo de insumos necessários para a precipitação na vazão considerada, assim como a característica e quantidade de mão de obra necessária para operar corretamente o sistema (Quadro 15).

ITEM	QTD	MATERIAL	DESCRIÇÃO
Cristalizador;	6	PRFV	ØSuperior = 2,6m; ØInferior = 0,4m Hútil = 3m
Agitador;	1	-	-
Escada e tripé	6	PRFV	-
Peneira	1	PRFV	-
Caixa de estruvita	6	PRFV	40x40x40
Reservatório	1	Polietileno	1000 litros
Tubulação	-	PVC	-
Bomba dosadora	2	-	-
Bombona Plástica	1	Polietileno	Para dosagem de Hidróxido de Magnésio
Bomba recalque	1	-	0,5CV

Quadro 15 - Resumo dos itens da proposta Fluir Engenharia.

Fonte: ANEXO 1.

O valor proposto para fabricação e instalação do sistema (CAPEX) é de R\$120.000,00.



Figura 35 - Desenho do cristalizador proposto pela Fluir Engenharia

Fonte: Proposta comercial Fluir Engenharia (Anexo 1)

O modelo de cristalizador proposto pela Fluir Engenharia é do tipo leito fluidizado, fazendo a recuperação da fase líquida da água residuária. Segundo Mangin e Klein (2004), esse tipo de reator geralmente pode ser inserido como etapa adicional em linhas de tratamento de efluentes em operações contínuas. Sendo assim, destaca-se

a vantagem de poder instalar esse tipo de reator em sistemas já existentes, sendo necessário poucas adaptações.

As variáveis que devem ser consideradas para cálculo do OPEX desse sistema são os custos de mão de obra para operação e manutenção, depreciação dos equipamentos e gastos com elementos químicos para controle do pH e precipitação dos cristais.

Os custos com mão de obra foram estimados com base em informações fornecidas pela empresa Fluir e comparados com o trabalho de Westerman, Zering e Rashash (2009). De acordo com a empresa, as tarefas realizadas por um operador para cristalizadores desse tipo exigem 1,5 horas por dia e são basicamente: remover a estuvita precipitada, monitorar o sistema e fazer mínimos reparos, e repor os produtos químicos. Para este cenário o custo estimado para esse profissional será de R\$800,00 por mês. Esse custo com mão de obra em determinados casos poderá não ser contabilizado, pois, de acordo com os autores, a maioria dos trabalhadores de fazendas que operam as ETARs do tipo lagoa têm capacidade para operar sistemas para recuperação de estuvita devido a sua simplicidade.

O percentual considerado para depreciação dos equipamentos será de 5% ao ano. Esse percentual se justifica pois os itens que compõem o sistema possuem diferentes depreciações. Os itens em Plástico Reforçado em Fibra de Vidro (PRFV), se realizada a manutenção preventiva, podem durar em média 30 anos, Já os equipamentos eletromecânicos têm vida útil muito menor, e varia bastante de acordo com as condições do ambiente, cuidados operacionais, etc. Assim como na pesquisa de Westerman, Zering e Rashash (2009), os gastos com energia elétrica serão desconsiderados nesse estudo por serem muito baixos se comparados aos outros itens de custeio.

Os elementos químicos utilizados no processo correspondem ao maior item de custeio do processo. Como já discutido no capítulo 1 do presente trabalho, existem diversas fontes de magnésio que podem ser utilizadas para cristalização da estuvita, no entanto neste cenário será considerado o Hidróxido do Magnésio ($Mg(OH)_2$), por ter sido a fonte recomendada pela empresa desenvolvedora do sistema. Além disso, Crutchik et al. (2018) concluíram em seu trabalho ao comparar MgO e $Mg(OH)_2$ que

ambos os produtos de magnésio opções promissoras para a cristalização de estruvita, mas que o $Mg(OH)_2$ foi mais eficaz que o MgO para recuperar o fósforo.

De acordo com os cálculos realizados pela empresa, nas condições apresentadas neste cenário será necessário utilizar a quantidade de 106,2Kg de $Mg(OH)_2$ por dia, ou seja, 38,75 toneladas por ano. O preço da tonelada de $Mg(OH)_2$ utilizado neste cenário foi fornecido por uma empresa localizada em Fortaleza – CE, que não permitiu que sua razão social fosse citada no presente trabalho, cuja carga mínima para entrega é de 1.300 Kg e o valor total é de R\$1.870,00. Sendo assim, foi considerado o valor do quilo de $Mg(OH)_2$ no valor de R\$1,44.

O período de viabilidade considerado nesse estudo foi de 10 anos, período considerado intermediário para estudos desse tipo, e por isso o aumento do preço de mercado das variáveis também foi estabelecido. Considerou-se que o preço do hidróxido de magnésio e da mão de obra sofrerão um aumento médio de 5% ao ano cada (percentual que atualmente se aproxima do IPCA). A Taxa Mínima de Atratividade (TMA) considerada foi de 10% (percentual médio de mercado para investimentos de baixo risco).

6.6.5 Receitas

A etapa mais complexa para elaboração desse cenário e de qualquer estudo de viabilidade que envolva a recuperação de estruvita é justamente definir o preço do produto. Não existe um mercado bem definido para esse produto, o que dificulta a precificação e comercialização. Conforme citado, no Brasil ainda não existe nenhuma empresa comercializando esse produto, o que nos obriga a estimar um preço de mercado. Existem três maneiras de estimar o preço de mercado da estruvita que será utilizada neste cenário: (1) utilizar valores encontrados na literatura; (2) estimar valores baseado nos preços de mercado de fertilizantes tradicionais; (3) utilizar valores encontrados em sites de busca de outros países.

Muitos autores relatam em seus trabalhos a dificuldade de definir um valor de mercado para a estruvita recuperada a partir do tratamento de águas residuárias, e, por isso, os valores divergem muito de estudo para estudo. Munch et al. (2001) estimaram em seu estudo o valor de AUS\$500,00 (dólar australiano) por tonelada, considerando que a estruvita deve ser vendida como um fertilizante de “boutique”, para aplicações

especiais. Shu et al. (2006) estimaram que o preço de mercado da estruvita em cerca de €464,00 por tonelada. Dockhorn (2009), com base em estimativas de fertilizantes de mercado, estimou o valor da estruvita em €763,00 por tonelada. Maaß, Grundmann e Polach, (2014) acrescentam que é importante destacar que o preço de mercado da estruvita é fortemente influenciado pelos custos de transporte e embalagem.

É possível também fazer uma estimativa do valor de mercado da estruvita baseado no preço de mercado de outros fertilizantes tradicionais. É importante esclarecer que nesse modelo a estruvita é comparada com fertilizantes vendidos em larga escala para agricultura, portanto não pode ser considerada um fertilizante para práticas especiais. Como já abordado anteriormente, a estruvita possui um percentual de fósforo semelhante ao da rocha fosfática, porém possui nitrogênio e magnésio em sua composição. Podemos então estimar que o valor de mercado da estruvita é maior que o da rocha fosfática. Já em relação ao fosfato diamônio (DAP), a estruvita possui menos fósforo e nitrogênio, porém possui magnésio em sua composição, o que contribui para seu valor de mercado. Sendo assim é possível estimar que seu valor de mercado é menor do que o do DAP. De acordo com o “*Indexmundi*”, o preço da tonelada de rocha fosfática no mês de março de 2018 foi cotado em USD\$86,00 (Figura 34), e o do preço do DAP em USD\$412,00 (Figura 35). Assumiu-se neste estudo que o valor de mercado da estruvita é de USD\$350,00, que transformados para reais totalizam R\$1.239,00 (cotação dólar comercial no dia 03 de maio de 2018, às 10:00, sendo R\$3,54).

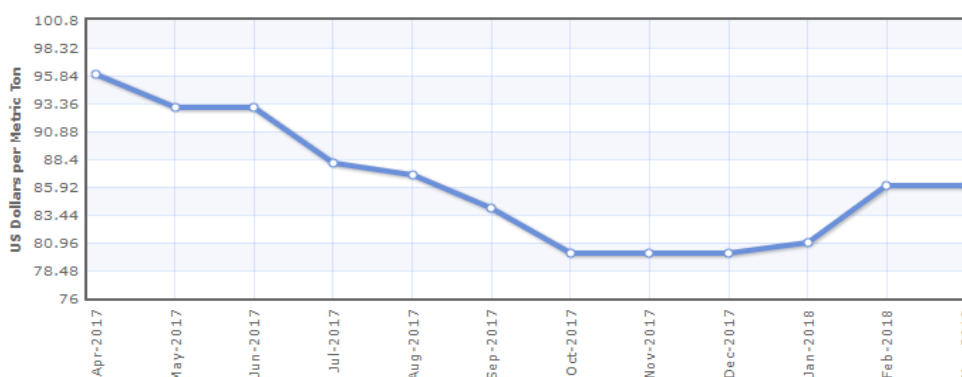


Figura 36 - Valor de mercado da rocha fosfática
Fonte: Indexmundi (2018)

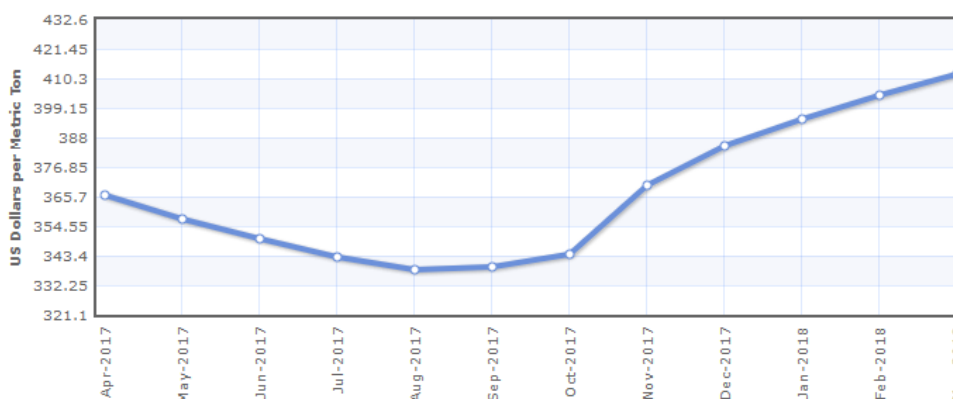


Figura 37 - Valor de mercado DAP
Fonte: Indexamundi (2018)

Outra maneira de estimarmos o preço de mercado da estruvita é pesquisando em sites de busca de outros países, já que no Brasil não existem vendedores desse produto. O site chinês Alibaba.com divulga diversas empresas comercializando estruvita, em geral voltadas para exportação. Procurando-se pela palavra “*struvite*” e “*magnesium ammonium phosphate*” (estruvita em inglês), são encontradas empresas como a Jiangxi Rutom Industrial Co., Ltd., Shijiazhuang Hanhao Trade Co., Ltd., e Yichang Shenfa Foreign Trade Co., Ltd vendendo estruvita com valores variando entre USD\$150,00 e USD\$700,00 a tonelada, dependendo da pureza do produto e da qualidade demandada (ALIBABA, 2018).

Diante das informações reunidas nesse estudo, utilizar-se-á o valor de USD\$350,00 ou R\$1.239,00 para a tonelada da estruvita. O percentual de aumento anual do preço da estruvita utilizado foi de 10% devido ao potencial de crescimento desse mercado e da relevância que o tema está ganhando por ser elemento chave na Economia Circular e Nexus.

6.7 Análise de viabilidade econômica do cenário

Sendo assim, a viabilidade econômica do cenário com as condições apresentadas até aqui foi chamada de cenário 1. Outros quatro cenários contaram com modificações das variáveis do CAPEX e OPEX. As variáveis modificadas em cada um dos cenários foram: percentual de depreciação dos equipamentos (cenário 2), preço da fonte de magnésio utilizada (cenário 3), preço da estruvita (cenário 4), e a redução do CAPEX (cenário 5). As modificações foram consideradas acumulativas de um cenário para o outro e a ferramenta utilizada para análise será o payback descontado.

CENÁRIO	VARIÁVEL MODIFICADA
1	-
2	Percentual depreciação
3	Redução preço insumos
4	Preço estruvita
5	Redução do CAPEX

Quadro 17- Variáveis modificadas no cenário.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

6.7.1 Cenário 1

Neste cenário os dados utilizados são os mesmos que foram apresentados ao longo deste capítulo, o que representam o cenário original. Os resultados indicam que não há payback da maneira como o cenário foi proposto, pois as receitas obtidas com a venda de estruvita não superam as despesas com o sistema dentro do período considerado neste estudo.

Tabela 9 - Dados considerados no cenário 1

Dados considerados	
CAPEX	R\$120.000,00
Taxa Mínima Atratividade	10% a.a
Quantidade estruvita recuperada por dia	118,3 Kg
Valor estruvita (R\$/Kg)	R\$1,24
Percentual aumento valor tonelada estruvita	10% a.a
Quantidade Mg(OH) ₂ utilizada diariamente	106,16 Kg
Preço Mg(OH) ₂ (R\$/Kg)	R\$1,44
Mão de Obra	R\$800,00 a.m
Aumento insumos químicos e mão de obra	5% a.a
Depreciação do sistema	5% a.a

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 10 - Payback cenário 1

Ano	Payback
0	-R\$120.000,00
1	-R\$134.605,01
2	-R\$146.192,16
3	-R\$154.914,41
4	-R\$160.916,33
5	-R\$164.334,60
6	-R\$165.298,53
7	-R\$163.930,44
8	-R\$160.346,13
9	-R\$154.655,26
10	-R\$146.961,66

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

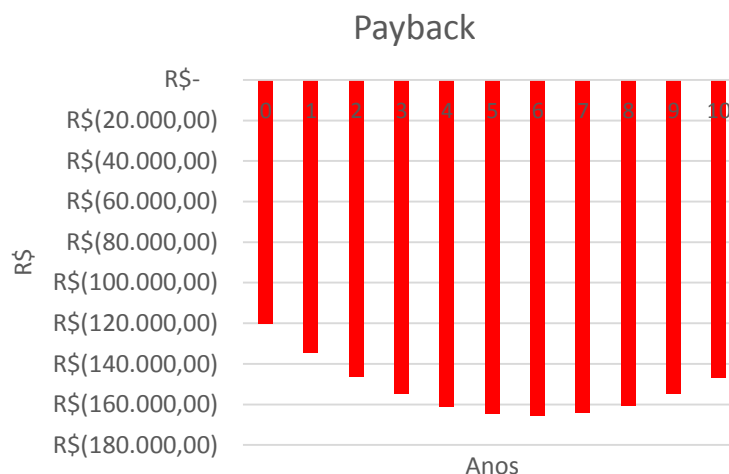


Gráfico 3 - Payback cenário 1.
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

6.7.2 Cenário 2 – Eliminação do percentual de depreciação

Neste cenário assumiu-se que as despesas com depreciação dos equipamentos consideradas no cenário 1 são equivalentes aos benefícios obtidos com a redução das incrustações nas tubulações da ETE causado pela formação de estruvita. Sendo assim retirou-se o percentual de depreciação nesse cenário e os resultados encontrados demonstram que não houve grande impacto no fluxo de caixa do estudo com relação ao cenário anterior.

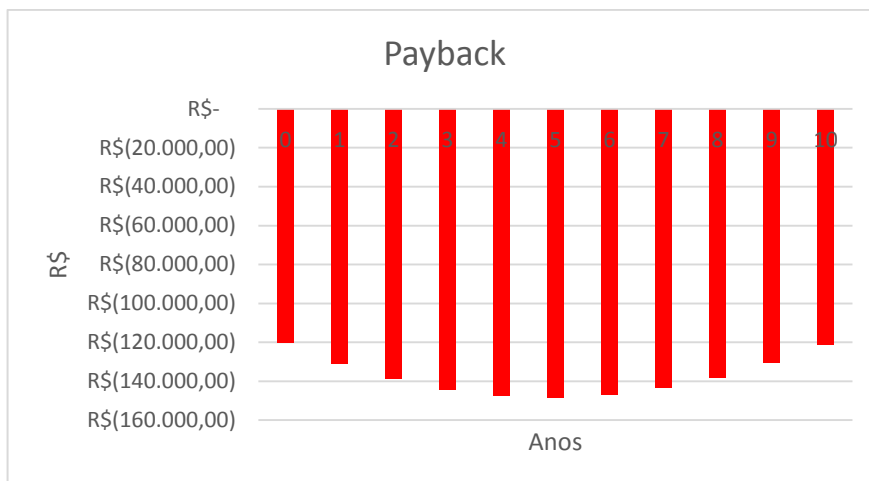
Tabela 11 – Dados considerados no cenário 2

Dados considerados -	
CAPEX	R\$120.000,00
Taxa Mínima Atratividade	10% a.a
Quantidade estruvita recuperada por dia	118,3 Kg
Valor estruvita (R\$/Kg)	R\$1,24
Percentual aumento valor tonelada estruvita	10% a.a
Quantidade Mg(OH) ₂ utilizada diariamente	106,16 Kg
Preço Mg(OH) ₂ (R\$/Kg)	R\$1,44
Mão de Obra	R\$800,00 a.m
Aumento insumos químicos e mão de obra	5% a.a
Depreciação do sistema	-

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 12 - Payback cenário 2

Ano	Payback
0	-R\$120.000,00
1	-R\$130.786,82
2	-R\$138.902,90
3	-R\$144.469,63
4	-R\$147.602,89
5	-R\$148.413,30
6	-R\$147.006,43
7	-R\$143.483,08
8	-R\$137.939,44
9	-R\$130.467,36
10	-R\$121.154,47

Gráfico 4 - Payback cenário 2
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

6.7.3 Cenário 3 – Variação do preço dos insumos

Neste cenário, que é uma variação do cenário 2, considerou-se a redução de preço do hidróxido de magnésio ou que uma nova fonte de magnésio de valor reduzido foi encontrada e passou a ser utilizada na cristalização da estruvita (nas mesmas quantidades). O valor da tonelada foi reduzido em 30% calculado em R\$1.008,00. Nestas condições o payback encontrado foi de pouco menos de 10 anos.

Tabela 13 - Dados considerados no cenário 3

Dados considerados -	
CAPEX	R\$120.000,00
Taxa Mínima Atratividade	10% a.a
Quantidade estruvita recuperada por dia	118,3 Kg
Valor estruvita (R\$/Kg)	R\$1,24
Percentual aumento valor tonelada estruvita	10% a.a
Quantidade Mg(OH) ₂ utilizada diariamente	106,16 Kg
Preço Mg(OH) ₂ (R\$/Kg)	R\$1,00
Mão de Obra	R\$800,00 a.m
Aumento insumos químicos e mão de obra	5% a.a
Depreciação do sistema	-

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 14 - Payback
cenário 3

Ano	Payback
0	-R\$120.000,00
1	-R\$115.778,09
2	-R\$109.567,64
3	-R\$101.459,06
4	-R\$91.538,61
5	-R\$79.888,65
6	-R\$66.587,80
7	-R\$51.711,11
8	-R\$35.330,19
9	-R\$17.513,42
10	R\$1.673,93

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

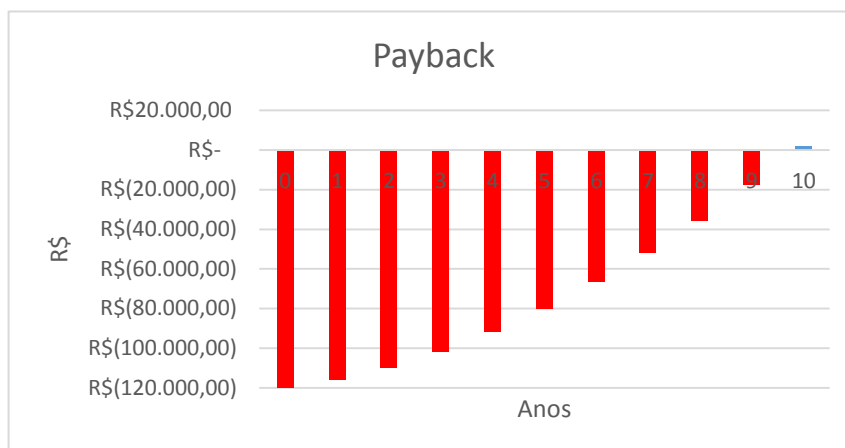


Gráfico 5 – Payback cenário 3
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

6.7.4 Cenário 4 – Variação do preço da estruvita

Neste cenário, que é uma variação do cenário 3, verificou-se o impacto no estudo de um aumento de 20% no valor encontrado da tonelada de estruvita. Nestas condições o payback encontrado é de aproximadamente 6 anos e 3 meses.

Tabela 15 - Dados considerados no cenário 4

Dados considerados -	
CAPEX	R\$120.000,00
Taxa Mínima Atratividade	10% a.a
Quantidade estruvita recuperada por dia	118,3 Kg
Valor estruvita (R\$/Kg)	R\$1,48
Percentual aumento valor tonelada estruvita	10% a.a
Quantidade Mg(OH) ₂ utilizada diariamente	106,16 Kg
Preço Mg(OH) ₂ (R\$/Kg)	R\$1,00
Mão de Obra	R\$800,00 a.m
Aumento insumos químicos e mão de obra	5% a.a
Depreciação do sistema	-

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 16 - Payback
cenário 4

Ano	Payback
0	-R\$120.000,00
1	-R\$106.184,17
2	-R\$90.379,81
3	-R\$72.677,31
4	-R\$53.162,95
5	-R\$31.919,08
6	-R\$9.024,31
7	R\$15.446,30
8	R\$41.421,13
9	R\$68.831,82
10	R\$97.613,08

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

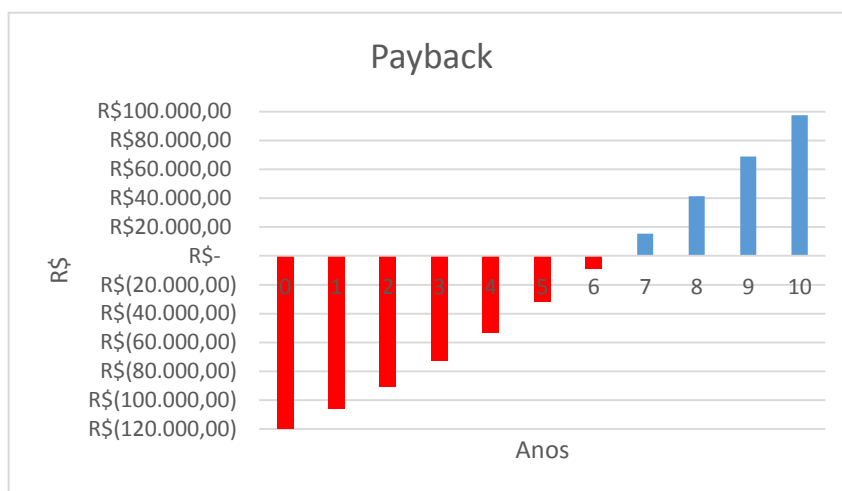


Gráfico 6 – Payback cenário 4

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

6.7.5 Cenário 5 – Redução do CAPEX

Por fim, foi modificada a variável CAPEX, reduzindo de 120 mil para 100 mil reais o valor do investimento inicial. Entende-se que com o passar dos anos a diminuição dos preços de tecnologias desse tipo seja a tendência natural, ainda mais considerando que cada vez mais empresas surgem disputando fatias de mercado. Sendo assim, neste cenário foi sugerida a redução de pouco mais de 17% do CAPEX inicial. Nestas condições (continuação do cenário 4) o payback encontrado foi de aproximadamente 5,5 anos. Este último cenário poderia ser chamado de “cenário ótimo”, por reunir as condições para que o payback ocorra em um período de tempo reduzido (em comparação aos cenários anteriores), o que do ponto de vista financeiro é muito bom para o investidor.

Tabela 17 - Dados considerados no cenário 5

Dados considerados -	
CAPEX	R\$100.000,00
Taxa Mínima Atratividade	10% a.a
Quantidade estruvita recuperada por dia	118,3 Kg
Valor estruvita (R\$/Kg)	R\$1,48
Percentual aumento valor tonelada estruvita	10% a.a
Quantidade Mg(OH) ₂ utilizada diariamente	106,16 Kg
Preço Mg(OH) ₂ (R\$/Kg)	R\$1,00
Mão de Obra	R\$800,00 a.m
Aumento insumos químicos e mão de obra	5% a.a
Depreciação do sistema	-

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tabela 18 - Payback
cenário 5

Ano	Payback
0	-R\$100.000,00
1	-R\$86.184,17
2	-R\$70.379,81
3	-R\$52.677,31
4	-R\$33.162,95
5	-R\$11.919,08
6	R\$10.975,69
7	R\$35.446,30
8	R\$61.421,13
9	R\$88.831,82
10	R\$117.613,08

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

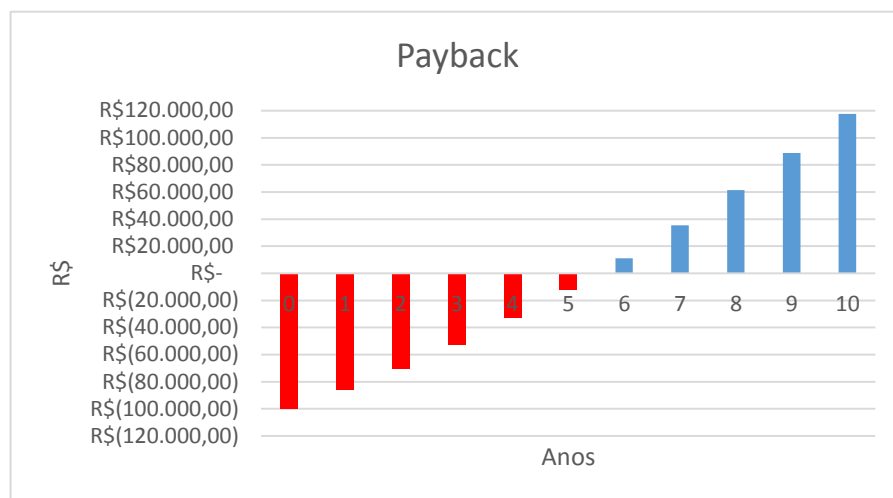


Gráfico 7 – Payback cenário 5
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

6.8 Conclusão

Apesar de ainda não existir um mercado para utilização da estruvita recuperada a partir do tratamento de águas residuárias no Brasil como fertilizante, entende-se que em breve este se desenvolverá principalmente devido aos preços futuros dos fertilizantes fosfatados. O país possui grande quantidade de potenciais produtores de estruvita, que são o foco dos vendedores de tecnologias para recuperação e reciclagem de estruvita, tanto no setor privado quanto no público. Conforme discutido, acredita-se que seja no mercado privado que essas empresas encontrarão mais aceitação para seus produtos, desde que os benefícios econômicos fiquem evidentes para os investidores. O estudo conclui também que são muitos os potenciais compradores de estruvita no país, e é interessante que devido a suas características, a estruvita seja comercializada como um produto refinado, para mercados mais exigentes como floriculturas, hortas orgânicas, etc.

Foi possível concluir que as duas variáveis que poderiam tornar viável economicamente a recuperação de estruvita dentro do período de 10 anos seriam o preço da estruvita e o preço da fonte de magnésio. Caso o preço da tonelada de estruvita partisse de R\$1.628,00 (aproximadamente USD\$459,90), sem modificar nenhuma das outras variáveis o payback aconteceria em aproximadamente 10 anos. Da mesma maneira se o preço do hidróxido de magnésio (ou outra fonte de magnésio)

partisse de R\$920,00 a tonelada (aproximadamente USD\$259,90), o retorno do investimento aconteceria em aproximadamente 10 anos. Sendo assim, é importante que estudos sejam realizados focando nessas duas variáveis, que aparentemente têm maior impacto nos resultados de análises de viabilidade econômicas desse tipo de projeto.

É necessário que outros estudos de viabilidade econômica sejam realizados com públicos-alvo diferentes. É possível que com clientes em que suas ETARs possuam correntes secundárias, os benefícios com redução de incrustações e manutenção de equipamentos sejam tão grandes que o payback aconteça em períodos mais curtos. Os sistemas de lodos ativados, por exemplo, bastante utilizados na Europa e América do Norte, são grandes produtores de lodo, e a redução da produção desse resíduo do tratamento de esgoto através da utilização de tecnologias recuperadoras de estruvita geralmente representa a variável economizadora de maior impacto. No caso da suinocultura, segmento de mercado “*target*” do cenário desenvolvido, a redução da produção de lodo não é fator de grande economia, sendo o principal retorno obtido com a instalação de tecnologia para recuperação de estruvita advindo da venda e/ou utilização do produto e redução de custos de operação e manutenção da ETAR.

Conclui-se que nas condições definidas para elaboração dos cenários, somente a venda da estruvita dificilmente tornará o investimento viável economicamente. Outros autores já haviam chegado a essa mesma conclusão, só que em segmentos de clientes diferentes e tipos de ETARs também, concluindo que a viabilidade econômica só ocorre caso seja considerado os benefícios com redução de despesas e benefícios externos, além da venda da estruvita. No caso da suinocultura, o payback depende da diminuição do OPEX (especialmente redução de custos com insumos) e aumento do preço da tonelada de estruvita (ou do fertilizante que será substituído com a sua utilização).

Não obstante, espera-se que em poucos anos a legislação para remoção de nutrientes em efluentes se torne mais restritiva, e, neste caso, a utilização desse tipo de tecnologia será de caráter quase que obrigatório para todos os clientes que possuem ETEs ou ETARs. Sendo assim, é importante avaliar a atual regulamentação brasileira relacionada a recuperação e reciclagem de nutrientes a partir do tratamento de águas residuárias, identificando-se os entraves que dificultam o desenvolvimento desse mercado.

6.9 Referências

AGUILAR, M. I.; SÁEZ, J.; LLORÉNS, M.; SOLER, A.; ORTUÑO, J. F. **Nutrient removal and sludge production in the coagulation-flocculation process.** Water Research, Murcia: v.36, p. 2910-2919, 2002. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135401005085>. Acesso em: out. 2017.

ALIBABA. Disponível em: https://www.alibaba.com/trade/search?fsb=y&IndexArea=product_en&CatId=&SearchText=struvite. Acesso em: abr.2018.

AMARAL A. L.; SILVEIRA, P. R. S.; LIMA G. J. M. M.; KLEIN C. S.; PAIVA, D. P.; MARTINS, F.; KICH, J. D.; ZANELLA, J. R. C.; FÁVERO, J.; LUDKE, J. V.; BORDIN, L. C.; MIELE, M.; HIGARASHI, M. M.; MORÉS, N.; COSTA, O. A. D.; OLIVEIRA, P. A. V.; BERTOL, T. M.; SILVA, V. S. **Boas Práticas de Produção de Suínos.** Circular técnica 50. Concórdia, SC, 2006. ISSN 0102-3713.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Atlas esgotos:** despoluição de bacias hidrográficas. Agência Nacional de Águas, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Brasília: ANA, 2017. ISBN: 978-85-8210-050-9

BIRD, A. R. **Evaluation of the Feasibility of Struvite Precipitation from Domestic Wastewater as an Alternative Phosphorus Fertilizer Resource.** Master's Projects and Capstones. University of San Francisco. 2015.

CASTRO, A. L. **Panorama da Participação Privada no Saneamento do Brasil 2017.** ABCON (Associação Brasileira das Concessionárias Privadas de Serviços Públicos de Água e Esgoto) e do SINDCON (Sindicato Nacional das Concessionárias Privadas de Serviços Públicos de Água e Esgoto), 2017.

CASTRO, S. R. **Precipitação de estruvita:** recuperação de nitrogênio e fósforo utilizando fontes alternativas de reagentes. Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2014.

CORNEL, P.; SCHAUM, C. **Phosphorus recovery from wastewater: needs, technologies and costs.** Water Science and Technology, v. 59, n. 6, p. 1069-1076, 2009.

CRUTCHIK, D.; RODRIGUES S.; RUDDLE D.; GARRIDO J. M. **Evaluation of a low-cost magnesium product for phosphorus recovery by struvite crystallization.** Journal of Chemical Technology and Biotechnology. ISSN 0268-2575; Online ISSN 1097-4660. Volume 93, Issue n° 4, pag.1012. 2018.

CRUZ, A. C.; PEREIRA F. S.; FIGUEIREDO V.S. **Fertilizantes organominerais de resíduos do agronegócio: avaliação do potencial econômico brasileiro.** Indústria química | BNDES Setorial 45, p. 137-187. 2017.

DIAS, A. C. **Manual Brasileiro de Boas Práticas Agropecuárias na Produção de Suínos.** Elaboração de Conteúdo Técnico. Brasília, DF: ABCS; MAPA; Concórdia: Embrapa Suínos e Aves. 2011.

DOCKHORN, T. **About the Economy of Phosphorus Recovery.** In Ashley, K., Mavinic, D. and Koch, F. (eds), International Conference on Nutrient Recovery from Wastewater Streams, London, IWA Publishing, 145-158. 2009.

BONETT L. P.; MONTICELLI C. J. **Suínos: o produtor pergunta, a Embrapa responde.** – 2. ed., rev. – Brasília, DF : Embrapa-SPI; Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 1998. 243 p. : il. – (Coleção 500 Perguntas, 500 Respostas). ISBN 85-7383-040-9

EUROPEAN COMMISSION. **Facts and figures on organic agriculture in the European Union.** Agriculture and Rural Development. 2016.

FUNDAÇÃO DO MEIO AMBIENTE – FATMA. **Instrução Normativa nº 11, outubro de 2014.** Suinocultura. Recomendações técnicas para aplicação fertilizantes orgânicos de suínos e monitoramento da qualidade do solo adubado. Disponível em:<[http:// www.fatma.sc.gov.br/ckfinder/userfiles/arquivos/ins/11/IN% 2011%20 Suinocultura.pdf](http://www.fatma.sc.gov.br/ckfinder/userfiles/arquivos/ins/11/IN%2011%20Suinocultura.pdf)>. Acesso em: Abr.2018.

HUKARI, S.; HERMANN, L.; NÄTTORP, A. **From wastewater to fertilisers - Technical overview and critical review of European legislation governing phosphorus recycling.** Science of the Total Environment 542,1127–1135. 2016.

INDEXMUNDI. Disponível em: < <https://www.indexmundi.com/>>. Acesso em: mar.2018.

KABBE, C. **Recovery and recycling options for urban P**. In 4th Sustainable phosphorus summit, 1–3 September 2014, Montpellier.

KATAKI, S.; WEST, H.; CLARKE, M.; BARUAH, D. C. **Phosphorus recovery as struvite from farm, municipal and industrial waste: Feedstock suitability, methods and pre-treatments**. Waste Management, v. 49, p. 437-454, 2016.

MAAß, O.; GRUNDMANN, P.; POLACH, C. B. **Added-value from innovative value chains by establishing nutrient cycles via struvite**. Resources, Conservation and Recycling; 87,126–136. 2014.

MANGIN, D.; KLEIN, J. P. Fluid dynamic concepts for a phosphate precipitation reactor design. In: VALSAMI-JONES, E. (ed.). **Phosphorus in environmental technologies: Principles and applications**. London: IWA Publishing, 2004. p. 358–400.

MAYER, B.; LAWRENCE, B.; TREAVOR, B.; DRECHSEL, P.; GIFFORD, M.; HANJRA, M.; PARAMESWARAN, P.; STOLTZFUS, J.; WESTERHOFF, P.; RITTMANN, B. **Total Value of Phosphorus Recovery**. Environmental Science and Technology; 50, 6606-6620. 2016.

METCALF, L.; EDDY, H. P. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos**. McGraw Hill Brasil, 2016.

MOLINOS-SENANTE, M.; HERNANDEZ-SANCHO, F.; SALA-GARRIDO R.; GARRIDO-BASERBA, M. **Economic Feasibility Study for Phosphorus Recovery Processes**. AMBIO, 40:408–416. 2011.

MOTA F. S. B.; von SPERLING M. **Nutrientes de esgoto sanitário: utilização e remoção**. Rio de Janeiro: ABES, 2009. ISBN: 978-85-7022-164-3.

MUNCH, E. V.; BARR K. **Controlled struvite crystallization for removing phosphorus from anaerobic digester sidestreams**. Water Research 35: 151–159. 2001.

MUNCH, E.; BENESOVSKY-SCOTT, A.; JOSEY, J.; BARR, K. **Making a business from struvite crystallization for wastewater treatment: turning waste into gold**.

Second International Conference on Recovery of Phosphates De: Sewage and Animal Wastes. March, 12–13, 2001, Noordwijkerhout, Holland.

PINTO, A. C. A. **Emprego de lagoas seriadas após reatores RAC-UASB para tratamento de águas residuárias de suinocultura.** Tese de doutorado. Escola de Veterinária da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Belo Horizonte, 2012.

PUCHONGKAWARIN, C.; GOMEZ-MONT, C.; STUCKEY, D. C.; CHACHUAT, B. **Optimization-based methodology for the development of wastewater facilities for energy and nutrient recovery.** Chemosphere, 140, 150-158. 2014.

RAHAMAN, M. S.; MAVINIC, D. S.; MEIKLEHAM, A. ELLIS, N. **Modeling phosphorus removal and recovery from anaerobic digester supernatant through struvite crystallization in a fluidized bed reactor.** Water Research, v. 51, 2014.

SANEPAR. **Diretrizes para elaboração de projetos de sistema de esgotamento sanitário - Estação de Tratamento de Esgoto – ETE.** Manual de projetos de saneamento; Módulo2. Revisão 2017.

SEBRAE. Disponível em: <<http://www.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/o-mercado-para-os-produtos-organicos-esta-aquecido,5f48897d3f94e410VgnVCM1000003b74010aRCRD>>. Acesso em: mai.2018.

SHU, L.; SCHNEIDER, P.; JEGATHEESAN, V., JOHNSON, J. **An economic evaluation of phosphorus recovery as struvite from digester supernatant.** Bioresource Technology 97, 2211–2216. 2006.

SIKOSANA, M. KLN.; RANDALL, D. G.; VON BLOTTNITZ, H. **A technological and economic exploration of phosphate recovery from centralised sewage treatment in a transitioning economy context.** Water SA, v. 43, n. 2, p. 343-353, 2017.

DE VRIES, S. C.; POSTMA, R.; VAN SCHOLL, L.; BLOM-ZANDSTRA, M.; VERHAGEN, A.; HARMS, I. **Economic feasibility and climate benefits of using struvite from the Netherlands as a phosphate (P) fertilizer in West Africa.** Wageningen Research, Report WPR-673. 48 pp.; 6 fig.; 14 tab.; 55 ref. 2017.

WESTERMAN, P. W.; ZERING, K. D.; RASHASH, D. **Struvite crystallizer for recovering phosphorous from lagoon and digester liquid.** Unpublished article. NC State University collaborative Extension program, USA, 2009. Disponível em: <http://www.bae.ncsu.edu/programs/extension/manure/lagoon/ag724w_struvite_crystallizer.pdf>

7 CAPÍTULO 3 – A REGULAMENTAÇÃO RELACIONADA A RECUPERAÇÃO E COMERCIALIZAÇÃO DA ESTRUVITA NO BRASIL E EUROPA

7.1 Introdução

É consenso entre as nações que uma transição em direção a um desenvolvimento realmente sustentável passa pela aplicação dos conceitos de Economia Circular e Nexus nas relações de produção e consumo. Alguns elementos críticos, como por exemplo o fósforo, já recebem maior atenção devido a previsão de exaustão das minas de rocha fosfática em alguns anos. Diversos pesquisadores acreditam que em um futuro próximo o maior percentual dessa *commodity* fundamental à vida terrestre esteja sob controle de poucos países, especialmente do Marrocos, que controlará esse mercado. Evitar essa dependência é uma preocupação em diversos países, e medidas estão sendo tomadas para isso.

A União Europeia (EU) está no centro de discussões para criação de incentivos e leis que permitam a exploração e comercialização de fontes alternativas de fósforo. Sabe-se que águas residuárias possuem grandes quantidades de nutrientes passíveis de serem recuperados e reutilizados, seja através do aproveitamento do lodo tratado ou precipitação de cristais (estruvita ou hidroxiapatita). O lodo de estações de tratamento é um resíduo rico em nutrientes, no entanto Sartorius, von Horn, Tettenbor (2012) acreditam que a crescente conscientização sobre questões ambientais impedirá que seja utilizado na agricultura em um número crescente de países na próxima década devido às restrições com base em metais pesados e micropoluentes. Já a estruvita tem sido considerada uma alternativa simples, sem riscos potenciais à saúde e que satisfaz critérios ecológicos. A contaminação mínima, fácil manuseio, e a facilidade de transporte e armazenamento, são fatores que corroboram para a aplicação de estruvita como fertilizante (CORNEL; SCHAUM, 2009).

No Brasil a quantidade de fertilizantes agrícolas produzidos internamente ainda é insuficiente para assegurar sua autossuficiência, tendo o país que importar aproximadamente 70% dos fertilizantes que utiliza (OYAMA, 2013). No capítulo 1 do presente trabalho calculou-se que em um cenário onde 100% da população brasileira fosse contemplada com serviços de coleta e tratamento de esgoto em sistemas coletivos, que o país estaria desperdiçando anualmente aproximadamente 54 mil

toneladas de fósforo por não recuperar nutrientes. Se ao menos parte dessa quantidade fosse recuperada, menos fertilizantes minerais precisariam ser importados e haveriam grandes benefícios ambientais nessa substituição.

Concluiu-se no capítulo 2 do presente trabalho que do ponto de vista econômico, projetos voltados para a recuperação de estruvita ainda são pouco atrativos. Não obstante, não se sabe se essa é a principal razão do pouco interesse dos investidores em projetos desse tipo no Brasil, pois de acordo com Morse et al., 1998 e Stemmann et al., 2014 (apud HUKARI; HERMANN; NATTORP, 2016), na Europa o número de tecnologias para recuperação de fósforo a partir de águas residuárias que se encontra em completa operação ou em escala piloto aumentou de 2 em 1998 para 22 em 2014, e atualmente os números são bem maiores. Sabe-se que os europeus estão mais familiarizados e comprometidos com os conceitos de Economia Circular e Nexus, mas é possível que questões relacionadas a regulamentação tenham influência nessa diferença da quantidade de projetos relacionados a recuperação de estruvita no Brasil e na União Européia.

Sendo assim, este capítulo tem como objetivo “comparar as legislações brasileira e europeia relacionadas à produção e comercialização de estruvita precipitada a partir do tratamento de águas residuárias, destacando os principais entraves para o desenvolvimento deste mercado.”

O capítulo está estruturado com os seguintes tópicos:

- A regulamentação brasileira relacionada à produção de estruvita recuperada a partir do tratamento de águas residuárias.
- A regulamentação europeia relacionada à produção de estruvita recuperada a partir do tratamento de águas residuárias.
- Comparação entre os principais aspectos regulamentares no Brasil e Europa relacionados aos produtores de estruvita.

Este capítulo pretende contribuir com uma análise de como está estruturada a atual regulamentação relacionada com a recuperação e comercialização de estruvita no Brasil e Europa, assim como descrever barreiras que essas regulamentações criam e as modificações que estão sendo propostas para o desenvolvimento deste mercado.

7.2 A regulação e regulamentação brasileira relacionada à produção de estruvita recuperada a partir do tratamento de águas residuárias

O setor do agronegócio é de grande importância para a economia brasileira, sendo responsável por grande parcela do PIB. De acordo com Cruz, Pereira e Figueiredo (2017, p. 142):

“Entre 2000 e 2015, o uso de fertilizantes no país cresceu 87%, contribuindo, em parte, para o significativo aumento da produção de grãos, no país, no mesmo período, de 150%. Entretanto, a produção nacional de fertilizantes é historicamente inferior à demanda nacional e não apresentou crescimento similar ao da demanda. Em função disso, a dependência em relação às importações vem aumentando ano após ano, e, em 2015, cerca de 65% do consumo total de fertilizantes foi suprido por importações”.

O Brasil é considerado um grande produtor de fertilizantes, no entanto ainda existe um desbalanceamento grande na relação oferta e consumo. Reduzir essa grande dependência das importações de insumos que impactam fortemente na economia do país é estrategicamente necessário. Sendo assim, fora os investimentos no aumento da produção interna, debate-se a necessidade de incentivos para utilização de fontes alternativas de nutrientes.

O órgão responsável por fiscalizar a produção e comercialização de fertilizantes, corretivos, inoculantes e biofertilizantes no Brasil é o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA, que “é responsável pela gestão das políticas públicas de estímulo à agropecuária, pelo fomento do agronegócio e pela regulação e normatização de serviços vinculados ao setor” (BRASIL, 2018a). O MAPA é responsável por fiscalizar o cumprimento das leis e estabelecer as disposições e critérios que regem o mercado de fertilizantes no país através de Instruções Normativas (IN).

De acordo com o MAPA (BRASIL, 2018b), estão entre as principais Leis, decretos e INs que regem o mercado de fertilizantes no país (Quadro 18):

Legislação	Descrição
<ul style="list-style-type: none"> Lei nº 6.894 de 16/12/1980 (posteriormente alterada pela Lei 12.890/2013) 	Primeira lei decretada em referência ao mercado de fertilizantes no país, e “Dispõe sobre a inspeção e a fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, biofertilizantes, remineralizadores e substratos para plantas, destinados à agricultura, e dá outras providências.
<ul style="list-style-type: none"> Decreto nº 4.954, de 14/01/2004 (posteriormente 	Aprova o Regulamento da Lei nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980, que dispõe sobre a inspeção e fiscalização da produção e do

alterado pelo Decreto 8.384/2014) n°	comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, ou biofertilizantes, remineralizadores e substratos para plantas destinados à agricultura
<ul style="list-style-type: none"> Instrução Normativa n°53, de 23/10/2013 (posteriormente alterada pela Instrução Normativa n°6 de 10/03/2016) 	Estabelece as disposições e critérios para as definições, a classificação, o registro e renovação de registro de estabelecimento, o registro de produto, a autorização de comercialização e uso de materiais secundários, o cadastro e renovação de cadastro de prestadores de serviços de armazenamento, de acondicionamento, de análises laboratoriais, de empresas geradoras de materiais secundários e de fornecedores de minérios, a embalagem, rotulagem e propaganda de produtos, as alterações ou os cancelamentos de registro de estabelecimento, produto e cadastro e os procedimentos a serem adotados na inspeção e fiscalização da produção, importação, exportação e comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, biofertilizantes, remineralizadores, substrato para plantas e materiais secundários; o credenciamento de instituições privadas de pesquisa; e os requisitos mínimos para avaliação da viabilidade e eficiência agrônômica e elaboração do relatório técnico-científico para fins de registro de fertilizante, corretivo, biofertilizante, remineralizador e substrato para plantas na condição de produto novo.

Quadro 18 - Principais Leis, decretos e INs que regem o mercado de fertilizantes no país.

Fonte: BRASIL (2018b).

Dentre as legislações elencadas, a IN n°6 será a mais discutida por estabelecer as regras e critérios que mais impactam sobre produtores, distribuidores e consumidores de fertilizantes com nutrientes reciclados (como a estruvita) no país. De maneira geral, a IN n°6 estabelece critérios e etapas para, entre outras coisas, regulamentar a produção e comercialização de novos produtos fertilizantes.

Atualmente, a prática mais frequente no país para aproveitamento de nutrientes em resíduos é a de reaproveitamento do lodo na agricultura, cujos critérios e procedimentos são determinados pela Resolução Conama n°375, de 29 de agosto de 2006. Sabe-se que o lodo possui grande carga de nutrientes valiosos, e a referida Resolução foi elaborada definindo critérios para a utilização desse resíduo de maneira segura na agricultura. Contudo, Sartorius, von Horn, Tettenbor (2012) destacam que a crescente conscientização sobre questões ambientais impedirá que o lodo seja utilizado na agricultura em um número crescente de países na próxima década devido às restrições com base em metais pesados e/ou micropoluentes. Por essas razões, muito países estão estimulando a recuperação de nutrientes via precipitação de estruvita, fertilizante natural com concentrações de N, P e Mg que pode ser recuperado a partir de tratamento de águas residuárias. Os muitos benefícios advindos da cristalização e comercialização desse produto foram abordados nos capítulos 1 e 2 deste trabalho.

Contudo, não existe no país legislação específica para o fertilizante estruvita, sendo necessário, portanto, que uma classificação seja proposta para esse produto. O Quadro 19 resume as opções para classificação de produtos estabelecidas na IN nº6, Capítulo 1, Art. 3º (BRASIL, 2016), sendo segmentados por atividade, categoria e características adicionais.

ATIVIDADE	CATEGORIA	CARACTERÍSTICA ADICIONAL
PRODUTOR	Fertilizante Mineral	Simple
		Simple em Solução
		Simple em Suspensão
		Complexo
		Misto
	Fertilizante Orgânico	Simple
		Composto
		Misto
		Organomineral
	Corretivo	De Acidez
		De Alcalinidade
		De Sodicidade
	Condicionador de Solo	-
Inoculante	-	
Biofertilizante	-	
Remineralizador	-	
Substrato para Plantas	-	
COMERCIAL	Produto comercializado embalado	-
	Produto comercializado em granel	-
PRESTADOR DE SERVIÇO E OUTROS	Serviço de Análise Laboratorial	Laboratório Próprio
		Laboratório Independente
	Serviço de Armazenagem	-
	Serviço de Acondicionamento	-
	Fornecedor de Minério	Mineradora
		Revendedora
	Gerador de Material Secundário	Geradora
Revendedora		

Quadro 19 - Classificação de produtos estabelecidas na IN nº6.

Fonte: BRASIL (2016).

Dentro das possibilidades de classificação, entende-se que a melhor opção seja enquadrar produtores e vendedores de estruvita na atividade “Prestador de Serviço e Outros”, e categoria “Gerador de Material Secundário”. A definição dessas classificações na IN nº6, capítulo 1, Artigo 2º (BRASIL, 2016) é:

[...]

IV – Gerador de Material Secundário: pessoa física ou jurídica, pública ou privada, cadastrada no MAPA, responsável por atividades ou empreendimentos que gerem ou vendam subprodutos autorizados, que possam ser destinados de forma segura para uso agrícola, direta ou indiretamente, com a função de fertilizante, corretivo, remineralizador e substrato para plantas ou como matéria-prima para a fabricação destes;

V – Prestador de Serviço de Armazenamento: pessoa física ou jurídica, detentora de instalações e equipamentos adequados, para armazenar os produtos abrangidos pelo Regulamento da Lei nº 6.894, de 1980, assegurando a integridade, a identidade e a qualidade destes;

As empresas classificadas como Geradoras de Material Secundário ficam obrigadas a se cadastrar o MAPA, e, para tal, é necessário acessar o site do MAPA e seguir o procedimento estabelecido pelo SIPEAGRO – Sistema Integrado de Produtos e Estabelecimentos Agropecuários. Esse cadastro tem prazo de vigência de cinco anos, pode ser renovado por iguais períodos. Ainda de acordo com a IN nº6, Capítulo 1, Art. 5º, parágrafo 7 (BRASIL, 2016):

“Fica também obrigada a se cadastrar no MAPA, como gerador de material secundário, a pessoa física ou jurídica que vier revender estes materiais gerados por terceiros, para uso direto na agricultura ou como matéria-prima para a fabricação de produtos, cuja comercialização deve observar o disposto no art. 16 do Anexo do Decreto nº 4.954, de 2004.”

Como a ideia é que a estruvita seja considerada um produto fertilizante, faz-se necessário atender o Art. 7º, Capítulo 2, Seção 1, da IN nº 6, que estabelece que os fertilizantes devem ser classificados quanto a sua natureza, nutrientes, categoria, e modo de aplicação. Não foram encontrados registros de cadastro do fertilizante estruvita, portanto sugere-se a seguinte classificação para esse produto (Quadro 20):

a) quanto à natureza	Fertilizante mineral
b) quanto aos nutrientes	Fertilizante binário (2 primários e 1 secundário)
c) quanto à categoria	Fertilizante mineral simples (produto formado, fundamentalmente, por um composto químico, contendo um ou mais nutrientes de plantas)
d) quanto ao modo de aplicação	Via solo

Quadro 20 - Classificação para fertilizantes na IN nº6.

Fonte: BRASIL, 2016.

Definida a classificação do produto, é necessário dar continuidade às etapas obrigatórias para registro do produto definidas no Capítulo 2, Seção 2 da IN nº 6. O Art. 8º estabelece que:

Para o registro de produtos e para concessão de autorizações para comercialização ou uso de materiais secundários[...], o interessado deverá apresentar à representação do MAPA na Unidade da Federação onde o mesmo se localizar ou aportar no sistema próprio, a ser disponibilizado pelo MAPA, por intermédio de metodologia eletrônica, as informações exigidas e os documentos previstos pelo regulamento da Lei no 6.894, de 1980, e pela legislação complementar.

§ 1o Os pedidos de registro de produto e das autorizações de que trata o **caput** deste artigo, serão analisados e decididos pelo órgão técnico de fiscalização do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento da Unidade da Federação onde estiver localizado o requerente.

[...]

§ 3o Observado o disposto no art. 16 do Anexo do Decreto no 4.954, de 2004, alterado pelo Decreto no 8.059, de 26 de julho de 2013, as autorizações para comercialização de materiais secundários serão específicas e de acordo com a finalidade de uso proposto, tendo seu prazo de validade condicionado ao prazo de validade do documento específico expedido pelo órgão ambiental competente. (BRASIL, 2016).

As etapas para cadastro de produto apresentadas mostram que os pedidos para registro de novos produtos são avaliados no MAPA das Unidades Federativas locais. A avaliação de produtos por equipes diferentes talvez seja um entrave para produtos reciclados, visto que não há uniformidade de decisões.

Além disso, como a estruvita pode ser cristalizada em diferentes granulometrias, é necessário seguir o estabelecido no Capítulo 3 da IN n°06, referente a embalagem e rotulagem dos produtos. Já existe um comércio de estruvita entre países, e para tal é necessário o ensacamento dos grânulos (Ex. Figura 36). O Art. 12° do Capítulo 3 estabelece a regras a serem seguidas caso o produtor de estruvita queira embalar e rotular o produto:

A embalagem e a rotulagem dos produtos comercializados no Brasil, além de atender ao disposto no regulamento da Lei no 6.894, de 1980, e nas legislações complementares, deverão conter informações corretas, claras e precisas sobre suas características e qualidades, indicação e recomendação de uso, quantidade, garantia, origem e, quando for o caso, composição, cultura(s) a que se destina(m), dosagem, cuidados, restrições, precauções, contraindicações, incompatibilidades e riscos que apresentam à saúde humana, animal e ao meio ambiente.

[...]

§ 3o O rótulo de produto fabricado sob terceirização deve conter também a expressão: "Produzido por..." (indicar o nome empresarial ou o número de registro do estabelecimento produtor contratado ou ambos).

§ 4o Para os produtos comercializados a granel, as informações exigidas devem constar da nota fiscal e de documento auxiliar da nota fiscal. (BRASIL, 2016).



Figura 38 - Estruvita ensacada em bolsas de 1m³ preparadas para o transporte.

Fonte: De Vries (2017).

Observa-se que do ponto de vista legal não há impeditivos para produção e comercialização de estruvita no Brasil. Na verdade, sequer se faz menção a esse produto, o que torna necessário a realização do seu cadastro. Se o cadastro do produto for feito dentro das condições exigidas, com os laudos analíticos com informações sobre a presença de contaminantes e seus respectivos teores sendo apresentados, acredita-se não haver razões para a não produção e comercialização desse cristal.

A importância da estruvita como fonte alternativa de fertilizantes agrícolas e a urgência para ações que estimulem esse mercado já foram amplamente discutidas ao longo deste trabalho, o que nos leva a concluir que esse mercado não se desenvolve provavelmente devido à falta de interesse de potenciais produtores. As principais razões podem ser relacionadas aos investimentos envolvidos ou devido à dificuldade para explorar essa atividade devido às barreiras regulamentares existentes. No entanto, em casos como esse em que o reuso é fundamental, o papel dos legisladores é central, pois podem através da criação de leis tornar a prática obrigatória. Um bom exemplo da atuação dos legisladores para estimular práticas sustentáveis é a obrigatoriedade da utilização de agregados reciclados oriundos de resíduos sólidos da construção civil classe A em obras públicas, já em prática em diversos municípios do país. Podemos citar, por exemplo, o Decreto 48075, de 28/12/2006, do município de São Paulo/SP; Decreto 852, de 15/08/2007 do Município de Curitiba/PR; Decreto 33971, de 13/06/2011 do município do Rio de Janeiro/RJ, etc. O reuso de águas

cinzas em edificações públicas e privadas praticamente inexistia antes das primeiras leis e decretos de obrigatoriedade, como, por exemplo, a Lei nº 2856, de 25/07/11, do município de Niterói/RJ, e a Lei nº 7463 de 18/10/2016 do Estado do Rio de Janeiro. No Brasil, esse tipo de Leis e Decretos são as principais ferramentas para desenvolvimento desse tipo de mercado, que contribuem fortemente para a preservação de recursos naturais ao tornar o ciclo “fechado” em conformidade com os conceitos de Economia Circular.

7.3 A regulamentação europeia relacionada à produção de estruvita recuperada a partir do tratamento de efluentes

Cada país possui regulamentação própria para uso de fertilizantes e outros produtos relacionados à produção agrícola. No entanto, é importante ressaltar os esforços da União Europeia (EU) para estabelecer leis aplicáveis a todo o bloco, permitindo o desenvolvimento do mercado de diversos produtos recuperados como, por exemplo, a estruvita.

Antes de abordar os aspectos regulamentares locais que impactam no mercado de estruvita, faz-se necessário destacar os investimentos em pesquisa e desenvolvimento, e o esforço para a criação de políticas que integrem todos os países do bloco para ampliação de mercados, desenvolvimento de empregos e aumento da qualidade de vida dos europeus. O comércio de insumos reciclados é uma das premissas da Economia Circular assim como o desenvolvimento de políticas que ultrapassem fronteiras é uma das premissas da abordagem Nexus.

Entre os anos de 2007 e 2013 aconteceu a primeira etapa do 7th Framework Program (7FP), principal instrumento da UE para financiamento de pesquisas. Esse programa deu origem a outro programa chamado P-REX, cuja finalidade é incentivar o desenvolvimento de tecnologias e pesquisas com foco em nutrientes recuperados de águas residuárias. Dentro do P-REX foi desenvolvido o eMarket, uma plataforma online cujo objetivo é apoiar a correspondência entre partes interessadas, como fornecedores de nutrientes recuperados e potenciais utilizadores finais à procura de matérias-primas e produtos secundários. É uma plataforma não comercial para facilitar o desenvolvimento do mercado de nutrientes reciclados, que já foi inclusive incluída no website da European Sustainable Phosphorus Platform (ESPP). A

preocupação em desenvolver mercados para nutrientes reciclados (especialmente o nutriente fósforo) é tão grande que diversos países do continente desenvolveram suas próprias plataformas como, por exemplo, a Holanda (Nederlands Nutrient Platform), a Alemanha (Deutsche Phosphor Platform), e Região do Mar Báltico (Baltic Sea Action Group - BSAG). De acordo com a PHOSPHORUS PLATFORM (2018), outros países ainda estão desenvolvendo suas plataformas, como a Bélgica, Islândia, Suíça e Reino Unido.

De acordo com documento “P-REX Police Brief” elaborado por Hukari, Nättorp e Kabbe (2015), as únicas minas de fósforo da Europa estão concentradas na Finlândia, e atendem a 8% da demanda do bloco econômico. Os outros 92% precisam ser importados, o que expõe a grande dependência externa desse elemento. De acordo com os autores, a maior demanda de fósforo no continente está relacionada ao uso de fertilizantes (65%), seguido de aditivos alimentares e detergentes e sabões.

Aproximadamente 15% da demanda de fósforo na União Europeia poderia ser suprida pela recuperação deste elemento de águas residuárias, reduzindo assim a dependência da importação (HUKARI; NATTORP; KABBE, 2015). Os autores complementam destacando que a recuperação de fósforo de águas residuárias também tem potencial para salvaguardar os solos contra a poluição e agentes patogênicos, criar “empregos verdes” adicionais e indústrias com potencial inclusive exportador. Tecnologias não serão obstáculo para alcançar esse fim, já que muitas delas já se encontram disponíveis no mercado, e algumas instaladas e operando em países do bloco econômico há vários anos.

Observa-se que há um grande interesse na comercialização de nutrientes reciclados para que sejam utilizados como fertilizantes na Europa, mas faz-se necessário avaliar se a regulamentação acompanha tal interesse dando confiança a potenciais produtores e clientes de estruvita.

Devido à atual falta de uniformidade entre os Estados-Membros da UE, a Comissão Europeia criou o chamado Pacote Economia Circular, “[...]um novo e ambicioso pacote relativo à economia circular para ajudar as empresas e os consumidores europeus a fazerem a transição para uma economia mais forte e mais circular, em que os recursos são utilizados de forma mais sustentável.” (Bakker, 2017, p. 12 - tradução nossa). De acordo com Bourguignon (2016, p.1), a criação deste pacote se fez necessária pois:

“Embora a gestão de resíduos na União Europeia tenha melhorado consideravelmente nas últimas décadas, quase um terço dos resíduos urbanos continua a ser depositado em aterro e menos de metade é reciclado ou compostado, com grandes variações entre os Estados-Membros. Melhorar a gestão de resíduos pode gerar efeitos positivos para o meio ambiente, o clima, a saúde humana e a economia.”

Como os resíduos do tratamento de efluentes em geral são ricos em nutrientes, a utilização dos mesmos como alternativa aos fertilizantes também tornou-se tema no Pacote Economia Circular, que tem como objetivo eliminar barreiras para o comércio desse tipo de produto entre os Estados-Membros. Os regulamentos mais importantes que regem o mercado de materiais reciclados, produtos recuperados e fertilizantes na UE atualmente estão relacionados no Quadro 21:

Regulamento	Descrição
<ul style="list-style-type: none"> Waste Framework Directive (WFD) 2008/98/EC. 	Reune os conceitos e as definições básicas relacionadas a gestão de resíduos, como as definições de resíduos, reciclagem e valorização.
<ul style="list-style-type: none"> Fertilizers Regulation (CE) n.º 2003/2003. 	Relativo aos adubos, estabelece as definições e os requisitos aplicáveis aos produtos colocados no mercado como fertilizantes CE.
<ul style="list-style-type: none"> REACH (Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals) (CE) n.º 1907/2006. 	Relativo ao registo, avaliação, autorização e restrição de produtos químicos.
<ul style="list-style-type: none"> CLP (Classification, labelling and packaging of substances and mixtures) (CE) n.º 1272/2008. 	Relativo à classificação, rotulagem e embalagem de substâncias e misturas.
<ul style="list-style-type: none"> The Mutual Recognition Regulation, Reg. (CE) n.º 764/2008. 	Regulamento que garante o livre comércio entre os Estados-Membros mesmo que o produto não cumpra integralmente as regras técnicas do outro país.

Quadro 21 - Regulamentos mais importantes que atualmente regem o mercado de materiais reciclados, produtos recuperados e fertilizantes na UE.

Fonte: Hukari, Nättorp e Kabbe (2015); Hukari, Hermann e Nättorp (2016); De Vries et al. (2017);

Como já destacado nos capítulos 1 e 2 deste trabalho, os maiores volumes de precipitação de estruvita ocorrem principalmente em Estações de Tratamento de Águas Residuárias (ETARs). A legislação que controla as instalações de recuperação e reciclagem inclui a Environmental Impact Assessment Directive (EIA; Dir. 2011/92/EU), e a Directive Industrial Emissions (IED; Dir. 2010/75/EU) (EUROPEAN PARLIAMENT, 2010; 2011 apud HUKARI; HERMANN; NATTORP, 2016). A necessidade de EIA e IED para uma instalação de recuperação e reciclagem depende

da legislação nacional e do julgamento das autoridades regionais, no entanto se resíduos forem utilizados como matéria prima na produção de fertilizantes, a instalação necessariamente deverá ser classificada como “gerenciadora de resíduos”, sendo obrigada a assegurar tratamento apropriado do resíduo de acordo com os Artigos 3 e 15 da WFD. De maneira geral, todas as operações em instalações de recuperação de insumos, que em geral são similares às praticadas nas plantas de produção de fertilizantes convencionais, precisam de permissão para suas instalações. Para ETARs a classificação como “gerenciadora de resíduos” não tem impacto nenhum, visto que gerenciar efluentes é seu negócio principal, no entanto caso queira produzir fertilizantes a partir da precipitação de estruvita, a instalação deve ser declarada como “produtora de fertilizantes”, que requerem verificações das permissões de EIA e IED (HUKARI; HERMANN; NATTORP, 2016).

De acordo com Hukari, Hermann e Nättorp (2016), critério do End-Of-Waste (EoW) da WFD (artigo 6, itens 1 e 2) estipula que em determinados casos a legislação relativa a produtos pode ser aplicada a materiais recuperados de resíduos. De acordo com a Comissão Europeia (2016), resíduos deixam de ser tratados como resíduos e obtêm um status de produto (ou matéria prima secundária) quando:

- i. A substância ou objeto é comumente usado para fins específicos;
- ii. Existe um mercado ou demanda para tal substância ou objeto;
- iii. A substância ou objeto preenche os requisitos técnicos para os fins específicos e atende à legislação e aos padrões existentes aplicáveis aos produtos; e
- iv. O uso da substância ou objeto não levará a impactos globais adversos sobre o meio ambiente ou sobre a saúde humana.

Hukari, Hermann e Nättorp (2016) ainda acrescentam que o fósforo recuperado e reciclado é classificado como resíduo, a menos que o reciclador tenha êxito no cumprimento dos critérios “EoW”. Caso sejam classificados como produtos, os mesmos precisam estar em conformidade com o REACH e a CLP 1272/2008. Como a decisão sobre o cumprimento dos critérios “EoW” é alcançada em nível nacional, um material pode adquirir status de produto em um país, mas não em outro.

Bakker (2017) acredita que a Comissão deve modificar a legislação para permitir que os materiais reciclados sejam reclassificados como não resíduos sempre que satisfaçam um conjunto de condições gerais aplicadas igualmente em toda a UE. Esta

alteração simplificará o quadro legislativo para os operadores do setor da reciclagem e a garantir condições equitativas. Se isso de fato ocorrer, a estruvita será oficialmente considerada pela UE como um produto comercial valioso e o resultado será uma maior produção e venda desse produto.

Para produzir e vender materiais classificados como “produtos” é necessário estar em conformidade com o Regulamento Europeu de Produtos Químicos, também conhecido como REACH (HUKARI; HERMANN; NATTORP, 2016). O REACH “é um regulamento da União Europeia adotado para melhorar a proteção da saúde humana e do meio ambiente contra os riscos que podem ser colocados pelos produtos químicos” (DE VRIES ET AL 2017, p. 36, tradução nossa). Este regulamento representa os requisitos oficiais para o uso e venda de todos os produtos químicos na UE, e, segundo Hukari, Hermann e Nättorp (2016), qualquer uma dessas substâncias (incluindo fertilizantes) manufaturados ou importados para EU que ultrapasse 1 tonelada por ano deve ser registrada na Agência Europeia de Produtos Químicos (ECHA). As empresas são responsáveis por coletar informações sobre as propriedades e usos das substâncias, e devem avaliar os perigos e riscos potenciais apresentados pela substância. Ainda de acordo com os autores, o registro é baseado no princípio “uma substância, um registro”. Isso significa que os fabricantes da mesma substância devem submeter seu registro em conjunto. O REACH facilita as formalidades regulatórias para substâncias recuperadas, ou seja, substâncias que resultam de um processo de recuperação na Comunidade Europeia e que são as mesmas que uma substância que já foi registrada estão isentas da obrigação de registro.

A Comissão Europeia, segundo Bakker (2017), emitiu um parecer por escrito em dezembro de 2015 informando que o art. 2º, item 7(d) do REACH aplica-se a estruvita recuperada. Sendo assim, uma vez que a substância tenha sido registrada pelo REACH por um produtor, outros produtores não precisam registrar o REACH. De acordo com Hukari, Hermann e Nättorp (2016), a primeira empresa a registrar a estruvita no REACH pela Berliner Wasserbetriebe (Alemanha), tendo esse processo durado aproximadamente 12 meses. Foi necessário a inclusão de expertise externa para preparação do dossiê, e os custos totais ultrapassaram 100 mil Euros, principalmente devido às extensas investigações, testes, taxas e outros custos (SCHITKOWSKY, 2014 apud HUKARI; HERMANN; NATTORP, 2016). Os novos

produtores de estruvita devem comprar os dados de pesquisa que a Berliner Wasserbetriebe registrou. Para outros produtores de estruvita, isto significaria que não são obrigados a preencher um registro separado, desde que seja possível demonstrar a equivalência do seu produto de estruvita com o da Berliner Wasserbetriebe, e para isso precisarão ter acesso ao registro pela Berliner Wasserbetriebe.

Para grandes recicladores que pretendem comercializar a estruvita por toda a UE, é necessário que seu produto possua status de produto e atenda aos critérios do REACH e EoW. No entanto, para que a estruvita produzida seja considerada um fertilizante, é necessário que atenda aos critérios da Regulamentação dos Fertilizantes (CE) 2003/2003 que rege as regras para esse tipo de produto no bloco. De acordo com Bakker (2017), a Comissão Europeia propôs uma harmonização facultativa para os produtos fertilizantes, tendo em conta os princípios da melhoria da regulamentação e da subsidiariedade. A harmonização facultativa significa que os fabricantes na UE podem optar por cumprir:

- O Regulamento de Fertilizantes da UE, adicionar a marca CE no seu produto e comercializá-lo em qualquer lugar dentro da UE, ou;
- Regras nacionais, que lhes permitem negociar seu produto em seu mercado nacional.

O Regulamento de Fertilizantes (CE) 2003/2003 do Parlamento e Conselho Europeu de 13 de Outubro de 2003, relativo aos fertilizantes, é a primeira legislação que rege todas as regras da UE aplicáveis aos fertilizantes (compostos químicos que fornecem nutrientes às plantas), assegurando que estes requisitos altamente técnicos sejam implementados de maneira uniforme (BAKKER, 2017). Segundo Hukari, Hermann e Nättorp (2016), esse regulamento está atualmente em revisão e deverá ser atualizado nos próximos anos. Os Estados-Membros geralmente possuem suas próprias legislações nacionais sobre fertilizantes que regulam a produção, admissão e utilização de fertilizantes e fornecem informações detalhadas sobre os tipos permitidos de fertilizantes, características, tolerâncias, condições de teste e outras restrições.

Os fertilizantes que cumprem o Regulamento de Fertilizantes da UE são denominados “fertilizantes CE”. Podem ser colocados no mercado em toda a UE sem restrições. Alternativamente, “fertilizantes não CE” podem ser colocados no mercado nacional se estiverem em conformidade com os regulamentos nacionais correspondentes

(HUKARI; HERMANN; NATTORP, 2016). Sendo assim, caso um fabricante de fertilizantes queira comercializar o seu produto em outro país da UE mas não cumpra o Regulamento dos Fertilizantes (ou seja, não seja um fertilizante CE), o mesmo deverá ser autorizado pelo país receptor caso aceite as regras nacionais do país produtor. Esse regulamento é chamado de Reconhecimento Mútuo. O princípio do Reconhecimento Mútuo (Regulamento (CE) n.º764/2008), e define os direitos e obrigações das autoridades públicas e das empresas que desejam comercializar os seus produtos noutro país da UE.

O Regulamento de Reconhecimento Mútuo garante o livre comércio entre os Estados-Membros mesmo que o produto não cumpra integralmente as regras técnicas do outro país, a menos que as características do produto sejam consideradas prejudiciais para a saúde humana ou para o ambiente, de acordo com as regras técnicas do Estado receptor (HUKARI; HERMANN; NATTORP, 2016; BAKKER, 2017). O Reconhecimento Mútuo entre os Estados-Membros da UE pode constituir uma brecha para a autorização do REACH. No caso em que o fertilizante reciclado é reconhecido nacionalmente e passou pelo processo nacional de EoW, ele poderia ser comercializado em outros Estados-Membros também. Por exemplo, se um produtor da França estiver em conformidade com as normas nacionais e quiser vender o composto a um comprador na Holanda, isso só acontecerá se a autoridade competente na Holanda aceitar as regras nacionais do país produtor (BAKKER, 2017).

O Regulamento de Reconhecimento Mútuo parece não ser familiar, uma vez que foi aplicado, em média, apenas para 5-10 fertilizantes por país e ano (CSES, 2010). O processo de candidatura, pelo menos em alguns países europeus, é tipicamente muito mais curto (alguns meses) do que a candidatura ao estado de fertilizante CE e as autoridades podem mostrar flexibilidade nas suas decisões, e não exigindo status EoW. Do ponto de vista do reciclador, o regulamento tem a vantagem de que o ônus da prova em caso de não aceitação é de responsabilidade das autoridades do país receptor.

Não obstante, para Hukari, Hermann e Nättorp (2016), o “fertilizante CE” continua sendo o status que oferece as melhores oportunidades de marketing para produtos com fósforo recuperado na Europa. Alguns tipos, por exemplo, fertilizantes NP ou PK, podem se qualificar imediatamente.

A revisão do Regulamento de Fertilizantes da UE visa agora integrar melhor os fertilizantes reciclados e incorporar aspectos de qualidade, sendo por isso crucial para o desenvolvimento futuro do mercado. Uma legislação harmonizada permitiria igualmente uma decisão comum sobre o estatuto de EoW, conduzindo a uma estrutura de mercado mais justa para os recicladores que pretendam vender o seu produto em diferentes Estados-Membros (HUKARI; HERMANN; NATTORP, 2016).

A European Sustainable Phosphorus Platform (ESPP) também tem empreendido esforços para que sejam estabelecidos critérios para o fertilizante estruvita utilizados por todos os Estados-Membros da UE. Em 2015 a ESPP elaborou uma proposta para o estabelecimento de critérios de regulação de fertilizantes na UE para estruvita recuperada, tendo como objetivo a utilização dos mesmos critérios tanto para a estruvita como fertilizante quanto para a estruvita como matéria-prima (ingrediente) para preparação de outros fertilizantes. Entre os pontos abordados estão a relação de substratos, características dos processos de recuperação, as purezas exigidas, os limites de contaminantes, os critérios para qualidade física e de segurança, etiquetagem, os testes e verificações. Tal proposta foi encaminhada para a Comissão Europeia para facilitar e acelerar o desenvolvimento dos critérios (ESPP, 2015).

De uma maneira geral, para recicladores de estruvita que têm como objetivo acessar o mercado europeu com seu produto, alcançar os critérios do REACH e o EoW é essencial. No entanto, para aqueles que pretendem reciclar em pequena quantidade, atender ao mercado local sob o status de resíduo é, atualmente, provavelmente a alternativa mais simples e menos custosa.

Com relação a rotulagem e embalagem dos produtos fertilizantes (incluindo a estruvita), produtores e exportadores são responsáveis pela avaliação, classificação, rotulagem e embalagem de seus produtos, segundo o Regulamento CLP (CE) n.º 1272/2008 (DE VRIES et al., 2017). De acordo com os autores, o Sistema Globalmente Harmonizado aborda a classificação de produtos químicos por tipos de risco, e destina-se a garantir que as informações sobre os riscos físicos e a toxicidade dos produtos químicos estejam disponíveis, a fim de melhorar a proteção da saúde humana e do meio ambiente durante o manuseio, transporte e uso desses produtos químicos. Determina elementos de comunicação de risco, incluindo instruções de etiqueta e fichas de dados de segurança.

7.4 Comparação entre os principais aspectos regulamentares no Brasil e Europa relacionados aos produtores de estruvita

A comparação entre aspectos regulamentares atuais relacionados aos produtores de estruvita no Brasil e Europa tem como objetivo principal avaliar em que estágio se encontram, assim como determinar qual o nível de discussão em que se encontram e os esforços que têm sido empenhados para estimular o desenvolvimento deste mercado.

Os potenciais produtores de estruvita no Brasil e em algum dos países membros da UE devem atender a algumas etapas para que possam produzir e comercializar estruvita. No Brasil o debate a respeito da necessidade de recuperação e reciclagem de estruvita ainda não existe, o que é confirmado pela inexistência de cadastro deste produto/resíduo no MAPA. De maneira geral, as etapas que um produtor de estruvita deve seguir no Brasil estão descritas na IN nº6, e são elas:

- a. Cadastrar o produto por atividade, categoria e característica adicional. Dentre as opções existentes, a classificação proposta nesta pesquisa é: Prestador de Serviço e Outros; Gerador de Material Secundário; Geradora.
- b. Por se tratar de um Material Secundário (classificação proposta), a etapa seguinte é o cadastro no SIPEAGRO do MAPA, inserindo as informações a respeito do produto que pretende-se produzir e comercializar.
- c. Outra classificação é necessária, e deve-se definir a natureza, nutrientes, categoria, e modo de aplicação. Dentre as opções existentes, a classificação proposta nesta pesquisa para a estruvita é: fertilizante mineral; binário; simples; via solo.
- d. Apresentação da documentação da empresa na Unidade de Federação local ou no sistema próprio do MAPA.
- e. Aguardar a análise do órgão técnico de fiscalização do MAPA a respeito do pedido de registro do produto e autorizações.
- f. Caso o produto seja aprovado, seguir as regras para embalagem e rotulagem do produto.

Percebe-se que a legislação e regulamentação no Brasil se encontra em um estágio mais avançado em benefício da produção e comercialização de fertilizantes orgânicos,

organominerais, e biofertilizantes, e pouco tem sido discutido a respeito da estruvita e outros fertilizantes minerais reciclados. A princípio não há nada na legislação atual que proíba a produção e comercialização de estruvita no país, no entanto seguramente há certa insegurança por parte dos produtores interessados por não haver informação suficiente disponível a respeito deste produto.

Na Europa a situação é diferente, pois por lá a estruvita já é recuperada e reciclada em larga escala em diversos países, e o esforço atualmente é para universalizar as regras entre os Estados-Membros de modo a estimular o comércio em todo o bloco. De maneira geral, atualmente um produtor de estruvita em um dos Estados-Membro da UE precisa seguir as seguintes etapas para a comercialização do seu produto:

- a. Uma instalação de recuperação e reciclagem de nutrientes, dependendo da legislação do país onde se encontra, precisa atender às exigências das diretivas EIA e IED. Caso a produção seja pequena e com intuito de comercialização local, a instalação deverá se declarar como “gerenciadora de resíduos”. No entanto, caso a instalação queira precipitar e comercializar a estruvita como um produto reciclado, a instalação deverá se declarar como “produtora de fertilizante”.
- b. A estruvita deverá atender aos critérios End-Of-Waste, para que seja submetida à legislação referente a produtos.
- c. Caso a instalação produza grandes quantidades de estruvita e o objetivo seja a venda em toda a UE, o produtor deverá atender aos critérios do REACH. Para tal deverá adquirir os dados de pesquisa registrados pela Berliner Wasserbetriebe (Alemanha). Caso o objetivo seja atender ao mercado local, o produto deve atender à legislação nacional de fertilizantes. Em ambos os casos o produto deve atender aos critérios da CLP 1272/2008 para classificação, etiquetagem e embalagem do produto.
- d. Caso o produto atenda aos critérios da Regulamentação dos Fertilizantes 2003/2003, o mesmo será considerado um fertilizante EC e poderá ser vendido livremente por toda a Europa. Esse registro é considerado bastante custoso e lento. Caso o fertilizante seja “não EC”, ou seja, não atenda todos os critérios da Regulamentação dos Fertilizantes, o mesmo poderá solicitar o Reconhecimento Mútuo para que possa ser comercializado em outro Estado-Membro.

Como é possível observar, o processo para que se consiga comercializar o produto estruvita entre os Estados-Membros da UE não é simples, podendo levar muitos anos e exigir grandes investimentos financeiros. No entanto já estão sendo discutidas medidas para facilitar o comércio de produtos como a estruvita entre os Estados-Membros, buscando simplificar as legislações. Como abordado anteriormente, vários países há muitos anos já recuperam e comercializam estruvita em grandes quantidades, tendo inclusive plataformas para compra e venda exclusiva para produtos que contenham fósforo reciclado. Acredita-se que em um futuro próximo o debate para o aprimoramento das legislações acerca de fontes renováveis de fósforo evolua na UE, contribuindo, assim, para o estímulo e desenvolvimento do mercado de estruvita em todo o bloco.

7.5 Conclusão

Como pôde ser verificado, aparentemente não existem fatores restritivos na legislação brasileira para a produção e comercialização de estruvita no Brasil, desde que seja atendido o conteúdo da IN nº6 do MAPA. No entanto não existem registros de cadastros ou consultas no MAPA para fertilizante estruvita, o que gera dúvidas a respeito das exigências que podem ser impostas a esse produto. É importante ressaltar que no Brasil os métodos lineares de produção ainda são o padrão, e que portanto a produção e comercialização de produtos reciclados ainda não é priorizada.

Acredita-se que o mercado de estruvita no Brasil se desenvolverá somente a partir do momento que houverem leis incentivando e exigindo a precipitação de nutrientes antes dos descartes do efluente. Para Mayer (2016), medidas políticas são frequentemente o único recurso para evitar externalidades negativas que são suportadas pelas gerações futuras.

Os operadores das grandes ETARs, grandes instalações que gerenciam os efluentes ricos em nutrientes, dificilmente irão se propor a recuperar nutrientes em consonância com as abordagens Nexus e Economia Circular, a menos que a instalação de tecnologias propicie retornos financeiros ou que haja algum tipo de exigência legal. No Brasil, a legislação para tratamento de efluentes é definida pelas Resoluções CONAMA 357/2005 e 430/2011 (BRASIL, 2011), e o objetivo principal é a preservação da qualidade dos corpos d'água. Neste sentido, os parâmetros definidos para

lançamento de nutrientes nos efluentes tratados são apenas restritivos, e não exigem a recuperação e reciclagem. Diariamente toneladas de nutrientes vão parar em aterros sanitários como parte do lodo de esgoto (quando há tratamento), desperdiçando elementos valiosos.

Em grande parte dos Estados-Membros da União Europeia a estruvita é recuperada há vários anos e utilizada como fonte alternativa de fósforo. Não obstante, o desafio atual do bloco é a simplificação e uniformização das leis para estimular o comércio deste produto entre países, estimulando cada vez mais potenciais produtores.

Para Hukari, Nättorp e Kabbe (2015) enquanto os benefícios financeiros não estiverem claro para os operadores de ETARs, a legislação pode desempenhar papel fundamental no desenvolvimento deste mercado. Para os autores devem haver mecanismos nacionais para a distribuição justa do custo da recuperação de fósforo (por exemplo, cota obrigatória de mistura de fertilizantes, obrigação de recuperação), e financiamento de projetos de demonstração, uma vez que as referências são obrigatórias para a penetração no mercado de tecnologias e produtos inovadores.

Conclui-se, portanto, que o desenvolvimento dos mercados de estruvita no Brasil e na Europa estão diretamente atrelados à evolução das respectivas legislações e regulamentações. Espera-se que em um futuro próximo a obrigatoriedade de recuperação e reciclagem de nutrientes em grandes instalações como ETARs se torne o padrão, assim como legislações e regulamentações que facilitem o registro de novos produtores e produtos estimulando assim o comércio local e entre países.

7.6 Referências

BAKKER, D. **Struvite**: technology, fertilizer legislation and cleaning of scaling by caustic Soda. van Hall Larenstein University of Applied Sciences. 2017.

BOURGUIGNON, D. **Circular economy package Four legislative proposals on waste**. Briefing, EU Legislation in Progress. Janeiro. PE 573.936. 2016.

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução Conama n° 430/2011**, de 13 de maio de 2011. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>> Acesso em: 19 de março de 2018. [Online].

BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). **INSTRUÇÃO NORMATIVA nº 06, de 10 de março 2016**. Diário oficial da união, Brasília-DF: seção 1, p.11, 14 de março de 2016.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). **Institucional**. [s.d.]. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/aceso-a-informacao/institucional>>. Acesso em: 25 maio 2018.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). **Institucional**. 2018. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacoes>>. Acesso em: 25 maio 2018.

CORNEL, P.; SCHAUM, C. **Phosphorus recovery from wastewater: needs, technologies and costs**. Water Science and Technology, v. 59, n. 6, p. 1069-1076, 2009.

CRUZ, A. C.; PEREIRA F. S.; FIGUEIREDO V.S. **Fertilizantes organominerais de resíduos do agronegócio: avaliação do potencial econômico brasileiro**. Indústria química | BNDES Setorial 45, p. 137-187. 2017.

CSES. **Evaluation of regulation (EC) 2003/2003 relating to fertilisers**. Final Report. European Commission DG Enterprise and Industry, Kent. 2010.

DE VRIES, S. C.; POSTMA, R.; VAN SCHOLL, L.; BLOM-ZANDSTRA, M.; VERHAGEN, A.; HARMS, I. **Economic feasibility and climate benefits of using struvite from the Netherlands as a phosphate (P) fertilizer in West Africa**. Wageningen Research, Report WPR-673. 48 pp.; 6 fig.; 14 tab.; 55 ref. 2017.

EUROPEAN SUSTAINABLE PHOSPHORUS PLATFORM (ESPP). **Proposed EU Fertiliser Regulation criteria for recovered struvite** - Versão 24, transmitido por DG GROW. 2015.

OYAMA, C. **Nutrientes da urina humana como fertilizante agrícola: análise de viabilidade econômica sobre um modelo de produção baseado na Economia Solidária e na Agricultura Familiar**. Dissertação de mestrado. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. São Paulo. 2013.

HUKARI S.; NATTORP A.; KABBE C. **P-REX Policy Brief. Phosphorus recycling – now!** Março, 2015.

HUKARI, S.; HERMANN, L.; NÄTTORP, A. **From wastewater to fertilisers -** Technical overview and critical review of European legislation governing phosphorus recycling. *Science of the Total Environment*; 542, 1127–1135. 2016.

MAYER, B.; LAWRENCE, B.; TREAVOR, B.; DRECHSEL, P.; GIFFORD, M.; HANJRA, M.; PARAMESWARAN, P.; STOLTZFUS, J.; WESTERHOFF, P.; RITTMANN, B. **Total Value of Phosphorus Recovery.** *Environmental Science and Technology*; 50, 6606-6620. 2016.

EUROPEAN SUSTAINABLE PHOSPHORUS PLATFORM (ESPP). Disponível em: <<https://phosphorusplatform.eu/platform/nutrient-platforms>>. Acesso em: 21/05/2018.

SARTORIUS, C.; HORN, J. VON; TETTENBORN, F. **Phosphorus recovery from wastewater. Expert survey on present use and future potential.** *Water Environmental Research*; 84, 313-323. 2012.

8 CONCLUSÃO GERAL

A recuperação e reciclagem de estruvita a partir do tratamento de águas residuárias tem despontado como uma das principais alternativas para resolver a escassez de fósforo prevista para o futuro. Essa ainda não é uma prática explorada no Brasil, o que pode ser considerado um problema para um país que importa a maior parte dos nutrientes e fertilizantes para abastecimento da demanda interna. Esse trabalho teve como objetivo principal “estudar a dinâmica de funcionamento de mercado e as condições de viabilidade técnicas, econômicas, comerciais e legais para comercialização de estruvita recuperada a partir de águas residuárias no Brasil”, com o propósito de reunir informações para que o mercado de estruvita se desenvolva no país.

As condições físico-químicas e biológicas para cristalização da estruvita já se encontram bem descritas na literatura, e é possível ser realizada em diferentes etapas do tratamento das águas residuárias. Diversas tecnologias já exploram esse mercado por todo o mundo, se diferenciando principalmente pelo tipo de reator adotado, e pelos produtos químicos no processo de cristalização. As informações reunidas permitem concluir que existe viabilidade técnica para o desenvolvimento do mercado de estruvita no Brasil.

Foram avaliadas as condições de viabilidade comercial e econômica para o desenvolvimento local do mercado de estruvita, identificando-se alguns potenciais consumidores de tecnologias para cristalização de estruvita e do produto final. Concluiu-se nessa pesquisa que as tecnologias para precipitação de estruvita tem maior potencial de aceitação no mercado privado de operadores de grandes ETARs, e que a estruvita deve ser ofertada como um fertilizante refinado de alto valor agregado. Para a análise de viabilidade econômica foram relacionadas as principais variáveis que devem ser consideradas nesse tipo de estudo. O cenário elaborado permite a conclusão de que dificilmente haverá payback no segmento-alvo escolhido nas condições apresentadas. É necessário que algumas variáveis de mercado se modifiquem, já que as variáveis “preço de mercado da tonelada de estruvita”, e o “valor da fonte de magnésio” utilizada no processo foram identificadas como as variáveis de maior impacto em estudos de viabilidade econômica para implantação deste tipo de tecnologia.

A análise da regulamentação vigente permite concluir que atualmente não existem empecilhos legais para a produção e comercialização da estruvita no país. Contudo, destaca-se o fato de não haver qualquer registro do produto estruvita no sistema do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), e, portanto, não há segurança legal para possíveis investidores interessados em explorar sua produção. Na União Europeia vários países já desenvolveram seus mercados internos de estruvita, e a regulamentação vigente incentiva esse tipo de prática. O desafio agora neste bloco econômico é o desenvolvimento de políticas públicas conjuntas que permitam a comercialização desse produto reciclado entre países, contribuindo assim com o fechamento do ciclo do fósforo em todo o continente.

9 RECOMENDAÇÕES GERAIS

- Realizar uma comparação detalhada entre as tecnologias para precipitação de estruvita, destacando suas vantagens e desvantagens como: eficiência energética, CAPEX, OPEX, preço médio da fonte de magnésio utilizada, etc.
- Elaborar um plano de negócios completo para uma empresa que pretende comercializar o fertilizante estruvita em determinada região. Levantar os custos fixos e variáveis da empresa, despesas operacionais, plano de marketing e logístico para avaliar possíveis pontos de distribuição e potencial de vendas são etapas importantes de futuros estudos.
- Realizar estudos de viabilidade econômica com tecnologias e segmentos-alvo diferentes dos utilizados neste estudo, comparando os resultados com os que foram encontrados nesta pesquisa.
- Pesquisar novas fontes de magnésio que tenham menor valor de mercado e que possam ser utilizadas no processo de cristalização da estruvita.
- Realizar uma pesquisa comparativa das legislações estrangeiras a respeito da produção e do uso da estruvita na agricultura.

10 ANEXOS

Anexo 1 – Proposta de fornecimento de cristalizador de estruvita.

		Fluir Engenharia Ltda. CNPJ: 04.674.799/0001-52 Tel: (27) 3244-7443 Rodovia do Sol, 2500 – Praia dos Recifes, Vila Velha/ES E-mail: comercial@fluirengenharia.eng.br	
Vila Velha (ES), 20 de março de 2018.			
Cliente: -			
Contato: Sr. Thiago			
Proposta 134/18.			
Escopo do serviço:			
Fornecimento e instalação de cristalizador de estruvita para vazão de 47,5m³/dia, contendo os seguintes itens:			
ITEM	QTD	MATERIAL	DESCRIÇÃO
Cristalizador;	6	PRFV	ØSuperior = 2,6m; ØInferior = 0,4m Hútil = 3m
Agitador;	1	-	-
Escada e tripé	6	PRFV	-
Peneira	1	PRFV	-
Caixa de estruvita	6	PRFV	40x40x40
Reservatório	1	Poliétileno	1000 litros
Tubulação	-	PVC	-
Bomba dosadora	2	-	-
Bombona Plástica	1	Poliétileno	Para dosagem de Hidróxido de Magnésio
Bomba recalque	1	-	0,5CV
Legenda: PRFV = Plástico Reforçado em Fibra de Vidro.			
			
Figura 1: Ilustração do sistema proposto.			
Preço: R\$120.000,00 (Cento e vinte mil reais).			
Incluso:			
<ul style="list-style-type: none"> • Materiais, deslocamento, alimentação e hospedagem da equipe. • Testes do sistema. 			

- Impostos.
- Frete (dentro do estado do Espírito Santo).
- Desenhos (fluxogramas e plantas).
- Anotação de Responsabilidade Técnica.
- Memorial Descritivo.
- Manual de Operações.

Exclusões:

- Projetos relacionados a parte civil.
- Aterros e reaterros.
- Urbanização
- Análises laboratoriais.
- Fiação do painel elétrico acima de 10m.

Tempo de serviço:

- 20 dias de fabricação.
- 6 de montagem.
- Total aprox. 26 dias úteis.

Condições de Pagamento: Entrada (50%)/Restante em até 5 dias após conclusão da instalação.

Garantias: 5 (cinco) anos para as partes do sistema em PRFV. A garantia dos itens restantes varia de acordo com o fornecedor.

Observações: Após o aceite da proposta, imediatamente a medição de entrada deverá ser paga para aquisição dos equipamentos que fazem parte do escopo do serviço. Sem o pagamento da medição de entrada os serviços não serão iniciados.

Esta proposta é válida por 30 dias.

Colocamo-nos à disposição para a prestação de dúvidas e esclarecimentos posteriores.