

JOSIANE NUNES MENDES

**RECUPERAÇÃO DE NUTRIENTES DA URINA HUMANA POR
PRECIPITAÇÃO DE ESTRUVITA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de Magister Scientiae.

Orientadora: Ana Augusta Passos Rezende

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2019**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

Mendes, Josiane Nunes, 1991-
M538r Recuperação de nutrientes da urina humana por
2019 precipitação de estruvita / Josiane Nunes Mendes. – Viçosa, MG,
2019.
72 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Ana Augusta Passos Rezende.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.62-69.

1. Precipitação (Química). 2. Fertilizantes fosfatados.
3. Moringa oleifera. 4. Cinza de madeira. 5. Fósforo.
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
II. Título.

CDD 22. ed. 660.28424

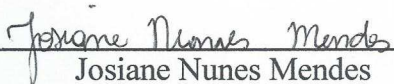
JOSIANE NUNES MENDES

**RECUPERAÇÃO DE NUTRIENTES DA URINA HUMANA POR
PRECIPITAÇÃO DE ESTRUVITA**

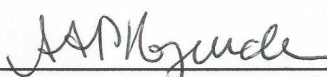
Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 23 de dezembro de 2019.

Assentimento:



Josiane Nunes Mendes
Autor



Ana Augusta Passos Rezende
Orientadora

**Aos meus pais e irmã, a minha família
e aos meus amigos por todo suporte,
compreensão, companheirismo,
carinho e amizade.
Obrigada!**

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por tudo que já superei e alcancei até aqui.

Aos meus pais e irmã, pelo amor incondicional, pelo apoio e suporte em todos os momentos e em todos os quesitos, por estarem ao meu lado durante todo esse processo. Eles são parte primordial da minha vida e sem eles eu não estaria finalizando mais essa etapa. A toda a minha família, em especial a minha vó, Juraci, exemplo de ser humano, mostrando através da sua vida que nunca é tarde para sonhar, fazer o quer e ama.

Aos meus amigos, que sempre tinham uma palavra de carinho para me oferecer. Principalmente aos amigos que ganhei neste mestrado, por todos os momentos me auxiliando de forma direta ou indireta no projeto e na vida, em especial ao André, Daiane e Iany.

A minha orientadora, Ana Augusta, pela orientação, oportunidade e pelos ensinamentos, obrigada.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), que pelo Programa de Pós-graduação da Engenharia Civil, me permitiu a oportunidade de vivenciar esta experiência. Juntamente, agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo apoio e concessão de bolsa de estudo.

Aos professores, técnicos e secretários do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil - UFV pelo apoio sempre que necessário, em especial à Priscila, Cilene e Elaine que não mediram esforços em me auxiliar. Aos técnicos e estagiários do Laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental (LESA), Laboratório de Celulose e Papel (LCP) e Laboratório de Resíduos da Indústria Florestal da UFV, muito obrigada. Em especial ao Carlinhos, Edinael e o Paulinho pela dedicação.

Ao professor Paulo Roberto Cecon do Departamento de Estatística pelo suporte na área, ao Laboratório de Microfluídica e Fluidos Complexos - Departamento de Física (UFV) e ao Laboratório de Fertilizantes – Departamento de Solos (UFV) pelas análises concedidas. Enfim, sou grata a todos os voluntários e aqueles que contribuíram de alguma forma para que estes resultados fossem alcançados. Muito obrigada de coração.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

"Nada disso foi do jeito que eu quis.
Se fosse como eu quis, não haveria
de ser tão sofrido, tão infeliz.
Mas eu – o eu que sou – eu não seria.

Assim, não me lamento. Até me sinto
como quem tem não o que foi pedido,
e sim o que, guiado pelo instinto,
não pelo querer, teria querido.

O que de mais duro a vida me deu
– que dura mais quanto mais me custou
dele me acostar, e torná-lo meu –

o que não escolhi, mas me escolheu,
é o que, ao fim e ao cabo, mais eu sou.
Não é o eu que eu me quis. Mas sou eu."

Paulo Henriques Britto

RESUMO

MENDES, Josiane Nunes, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2020.
Recuperação de nutrientes da urina humana por precipitação de estruvita.
Orientadora: Ana Augusta Passos Rezende.

O crescimento da população mundial diretamente afeta a demanda por alimentos, e com isso por fertilizantes. Neste cenário, o macro nutriente fósforo ganha destaque devido a projeção de sua escassez nos próximos anos. Buscando formas de obtenção de fósforo, a urina humana mostra-se uma alternativa em potencial para sua recuperação em forma de estruvita. Neste trabalho, a eficiência de precipitação da estruvita da urina humana fresca e sem diluição foi avaliada utilizando o óxido de magnésio (P.A.) e fontes alternativas de magnésio: cinza vegetal, cal hidratada e moringa oleífera. Avaliaram-se os parâmetros operacionais por meio de teste de jarros e posteriormente sua replicabilidade em um protótipo de reator de precipitação de estruvita. Caracterizaram-se os materiais quanto à quantidade de nutrientes e aos cristais de estruvita formados, comparando-os aos fertilizantes comerciais. O melhor resultado do teste de jarros foi para a velocidade de rotação de 60 rpm e a razão molar de $MgO:P$ igual a 2:1, obtendo 61% de recuperação de fósforo. A cal hidratada e as cinzas recuperaram 99% de fósforo da urina humana, porém, a análise de DRX mostrou que não se formaram cristais de estruvita com a cal hidratada. O reator de recuperação de nutrientes em forma de precipitação de estruvita replicou de forma eficaz os resultados obtidos nos ensaios dos testes de jarros.

Palavras-Chave: Precipitação (química). Fertilizantes fosfatados. Moringa Oleífera. Cinzas de madeira. Fósforo.

ABSTRACT

MENDES, Josiane Nunes, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, December 2019. **Nutrient recovery from human urine by struvite precipitation.** Adviser: Ana Augusta Passos Rezende.

The increase of world population directly affects the demand for food, and with that for fertilizers. In this scenery, the macronutrient phosphorus has gained prominence due to the scarcity projected the coming years. Human urine has been shown to be a potential alternative for recovery of phosphorus in struvite form. In this work, precipitation efficiency of fresh and undiluted human urine was evaluated for struvite precipitation using magnesium oxide and alternative magnesium sources: wood ash, hydrated lime and moringa seed. Operational parameters were evaluated by jar test and subsequently their replicability in a struvite precipitation reactor. The materials were characterized by the amount of nutrients and crystals formed and compared to commercial fertilizers. The best jar test results were obtained at 60 rpm and a 2: 1 MgO: P molar ratio, obtaining 61% phosphorus recovery. Hydrated lime and ash recovered 99% phosphorus from human urine, but XRD analysis showed no struvite crystals formed for hydrated lime. The nutrient recovery reactor effectively replicated the struvite precipitation results obtained in the jar test assays.

Keywords: Precipitation (chemical). Phosphate fertilizers. Moringa Oleifera. Wood ash. Phosphor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Definição dos diferentes tipos de águas que englobam o esgoto doméstico .	17
Figura 2 – Processo de obtenção de estruvita com adição de magnésio	23
Figura 3 – Imagem microscópica eletrônica de varredura de estruvita tipo agulha.....	23
Figura 4 – Fluxograma das etapas da pesquisa	29
Figura 5 – Recipientes de coleta de urina. (A) Garrafas plásticas tipo pet. (B) Vaso sanitário segregador de urina e fezes.	30
Figura 6 – Suporte com os filtros para recuperação de estruvita	35
Figura 7 – Representação gráfica do reator de recuperação de estruvita com o filtro	36
Figura 8 – Protótipo do reator de recuperação de estruvita	37
Figura 9 – Difratoograma de raios-X da amostra de estruvita	54
Figura 10 – Difratoograma de raios-X do precipitado com óxido de magnésio P.A.....	56
Figura 11 – Porosidade dos meios filtrantes	58

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Porcentagem de nutriente de acordo com sua origem e quantidade total das águas presentes no esgoto doméstico	18
Gráfico 2 – Relação entre a quantidade de material das fontes de magnésio e o pH.....	45
Gráfico 3 – Porcentagem de recuperação de fósforo da urina humana.....	45
Gráfico 4 – Relação entre pH e a porcentagem de recuperação de fósforo da UH.....	49
Gráfico 5 – Percentual de sólidos retidos nos materiais filtrantes	58

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Métodos de produção de estruvita.....	25
Quadro 2 – Tipos de reatores empregados para recuperação de nutrientes como estruvita e condições operacionais.....	26
Quadro 3 – Estudo conduzidos para precipitação de estruvita a partir da urina humana	27
Quadro 4 – Aplicação de estruvita proveniente de urina humana em cultivos.....	28
Quadro 5 – Parâmetros analisados para caracterização da urina fresca e as respectivas metodologias ¹ utilizadas.....	31
Quadro 6 – Métodos de preparo da Moringa oleifera e processos utilizados no teste de jarros.....	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização da Urina humana.....	40
Tabela 2 – Nutrientes presentes na semente de Moringa oleífera.....	41
Tabela 3 – Nutrientes presentes na cinza vegetal.....	42
Tabela 4 – Porcentagem granulométrica das frações de cinzas e da Moringa oleífera (almofariz e triturador).....	43
Tabela 5 – Tempo de estabilização do pH das fontes de magnésio	44
Tabela 6 – Resumo da análise de variância da porcentagem de recuperação de fósforo (PRF), do pH inicial (pHI) e final (pHF), temperatura inicial (TI) e final (TF), condutividade inicial (CI) e final (CF) e os respectivos coeficientes de variância.....	48
Tabela 7 – Valores médios da PRF, PHF, TI, TF e CI do sobrenadante para as respectivas relações de velocidade de rotação no JarTest e dose.	48
Tabela 8 – Quantidade de magnésio presente nas fontes alternativas de magnésio de acordo com o pH	50
Tabela 9 – Porcentagem de recuperação de fósforo da UH com Moringa Oleífera	51
Tabela 10 – Caracterização do sobrenadante da primeira etapa do teste de jarros	53
Tabela 11 – Caracterização dos materiais precipitados com diferentes fontes de magnésio	55
Tabela 12 – Comparação entre os teores obtidos para os produtos obtidos dos materiais fontes de magnésio e os fertilizantes comerciais	57

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS	16
2.1 Objetivo geral	16
2.2 Objetivos específicos	16
3 REFERENCIAL TEÓRICO	17
3.1 Principais características quanti-qualitativas da urina humana	20
3.2 Precipitação de estruvita na urina humana	22
3.2.1 Propriedades químicas e físicas da estruvita	22
3.2.2 Principais tecnologias usadas na obtenção de estruvita	24
3.2.3 Principais fontes de magnésio usadas na obtenção de estruvita	27
3.3 Estruvita de urina humana aplicada na agricultura	28
4 MATERIAL E MÉTODOS	29
4.1 Coleta e caracterização da Urina Humana	30
4.2 Caracterização dos materiais fontes de magnésio	31
4.3 Ensaios preliminares: tempo de estabilização e alcalinização	32
4.4 Determinação das condições ótimas de precipitação de estruvita – Teste de Jarros	32
4.4.1 Definição dos parâmetros: velocidade de rotação e dose do coagulante	32
4.4.2 Definição do pH ótimo para recuperação de estruvita	33
4.4.3 Recuperação de fósforo com Moringa Oleifera	33
4.5 Análise do sobrenadante dos testes de jarros do processo de precipitação de estruvita	35
4.6 Análise do precipitado do processo de precipitação de estruvita	35
4.7 Sistema de precipitação de estruvita	36
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
5.1 Caracterização da urina humana (UH)	39

5.2	Caracterização das fontes de magnésio	41
5.3	Ensaio preliminares: definição do tempo de estabilização e do potencial alcalinizante das fontes de magnésio	43
5.4	Condições ótimas de precipitação de estruvita	45
5.4.1	Definição da velocidade de rotação e razão molar	45
5.4.2	Definição do parâmetro pH utilizando fontes alternativas de magnésio	49
5.4.3	Definição da melhor forma de extração e dose de Moringa oleifera para recuperação de fósforo da urina humana	51
5.5	Análise do sobrenadante	52
5.6	Caracterização e avaliação dos precipitados	54
5.6.1	Caracterização do sólido da etapa de definição da velocidade de rotação e razão molar	54
5.6.2	Caracterização do sólido da etapa de análise do pH	54
5.7	Protótipo de reator de recuperação de nutrientes em forma de estruvita	57
5.7.1	Replicabilidade do teste de jarros no protótipo de reator de estruvita	58
6	CONCLUSÕES	60
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
	REFERÊNCIAS	62
	APÊNDICE A – Resultados do Jart-Test: Variação da velocidade de rotação (rpm) e concentração/dose de óxido de magnésio na urina humana	70
	APÊNDICE B – Resultados da análise do sobrenadante do teste de jarros com óxido de magnésio	71
	APÊNDICE C – Dimensões do protótipo de recuperação de nutrientes da urina humana em forma de estruvita	72

1 INTRODUÇÃO

A população mundial deve crescer cerca de 40% até o ano 2050, chegando a 9,6 bilhões de habitantes (ONU, 2014). Com isto, estimaram-se que a demanda por alimento aumente em torno de 60% (FAO, 2013) e consequentemente aumentando o uso de fertilizantes agrícolas.

Neste contexto, destacaram-se a necessidade de outras fontes de fertilizantes, em substituição e/ou complementação aos reagentes químicos usados atualmente, destacaram-se principalmente aqueles a base de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), buscando contribuir assim, com a prática da agricultura sustentável.

É previsto que o fósforo se esgote em menos de 70 anos (KATAKI et al., 2016), necessitando, assim, de fontes alternativas de obtenção. A futura carência de fósforo está intimamente ligada à segurança alimentar mundial, dada a dependência da fertilização do solo para a manutenção da produtividade agrícola nos padrões atuais do agronegócio.

De acordo com Mihelcic, Fry e Shaw (2011), o fósforo total disponível nas excretas humanas (fezes e urina) representa cerca 22% da demanda global. Sendo assim, se recuperado, poderá contribuir com a diminuição dos impactos ambientais causados pelo processo de mineração tradicional para obtenção de fósforo.

A urina humana corresponde a menos de 1% do fluxo volumétrico total afluente às ETEs, porém contém elevadas quantidades de nutrientes, principalmente, fósforo, potássio e nitrogênio (LARSEN et al., 2004), a sua utilização reduziria a necessidade dos agricultores utilizarem fertilizantes industriais, reduzindo o uso de água quando tais sistemas são acoplados com sanitários secos e também contribuindo com o saneamento ambiental.

Além disso, a urina possui baixos níveis de agentes patogênicos, representando grande potencial como fertilizante (RANASINGHE et al., 2016), contudo, preocupações quanto à presença de fármacos e desreguladores endócrinos persistem.

Ressaltaram-se que as altas concentrações de P e N, nutrientes da urina humana, em esgoto doméstico são consideradas uma das causas dos entupimentos e incrustações em tubulações dos sistemas de coleta e nas estações de tratamento de esgoto por precipitação de estruvita ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$) e hidroxiapatita, além de contaminar os lençóis freáticos e corpos hídricos superficiais causando um crescimento na comunidade de fitoplâncton e eutrofização do ambiente aquático.

Além disso, a obtenção dos fertilizantes comerciais, normalmente utilizam energia fóssil no processo de recuperação nas jazidas e são recursos minerais finitos, com risco de estarem contaminados por metais pesados que podem vir a ser minerados concomitantemente no processo.

Sendo assim, a separação da urina é uma opção para minimizar o envio de nutrientes e poluentes não tratados que possam vir a ser destinados ao meio ambiente e para a obtenção do P de uma forma ambientalmente correta.

Deve ser destacado que a urina já é utilizada como fertilizante, porém necessita passar por um processo de armazenamento de até seis meses para garantir a eliminação completa de possíveis patógenos e contaminantes. Este processo pode vir a limitar a sua utilização pelo agricultor devido ao espaço necessário para seu armazenamento. Obter os nutrientes presentes na urina, a partir da recuperação de estruvita (fosfato de amônio magnésiano), é uma das formas de solucionar o problema de armazenamento, acelerar o processo de obtenção dos nutrientes presentes, e também contribuir para o saneamento ambiental.

Em um cenário onde os recursos vão ficando mais escassos e, por consequência, mais caros, buscar caminhos para garantir a fertilidade do solo exige abordagens diferentes das existentes atualmente. Assim sendo, a recuperação de nutrientes da urina humana como estruvita pode ser vista como uma solução sustentável e circular para questões de saneamento básico e segurança alimentar.

Deste modo, o presente trabalho objetivou recuperar nutrientes da urina humana a partir do estudo de vários tipos de materiais a base de magnésio, como agente precipitador de estruvita, e comparando o potencial da mesma com outros fertilizantes comerciais.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Recuperar nutrientes da urina humana através da precipitação de estruvita, utilizando fontes alternativas de magnésio, e analisar seu potencial como fertilizante fosfatado para uso e aplicação na agricultura.

2.2 Objetivos específicos

- Determinar as variáveis e condições operacionais que melhor recuperem fósforo total da urina humana usando diferentes fontes de íons de magnésio;
- Comparar a estruvita produzida da urina humana com fertilizantes comerciais fosfatados;
- Avaliar um protótipo de reator de recuperação de estruvita, quanto ao desempenho na recuperação de fósforo da urina humana.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

De acordo com o censo demográfico de 2010 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2011), 29,9 milhões de pessoas residem em localidades rurais totalizando, aproximadamente, 8,1 milhões de domicílios. Dessa parcela, 17% realizam tratamento de efluentes doméstico de forma adequada, 54% possuem atendimento precário e 28% não são atendidos por redes de coleta de esgoto.

Para auxiliar no atendimento dessa demanda são necessários sistemas simplificados, de fácil implementação e manutenção, para realização do tratamento do esgoto doméstico de forma eficaz.

Os sistemas de tratamento das águas residuárias domésticas podem ser simplificadas e/ou segregada. As águas pretas dos vasos sanitários, englobam as águas marrons e as amarelas, há também as águas cinzas e as águas azuis. A Figura 1 exemplifica a procedência de cada água (1), forma de tratamento (2) e como é utilizada e/ou aplicada (3).

Figura 1 – Definição dos diferentes tipos de águas que englobam o esgoto doméstico

Esgoto Doméstico			Águas Pluviais
Águas do vaso sanitário			
Águas Marrons	Águas Amarelas	Águas Cinzas	Águas Azuis
(1) Fezes	(1) Urina	(1) Chuveiros e pias, entre outros	(1) Chuvas
(2) Digestor anaeróbio; compostagem	(2) Estocagem; Congelamento; Precipitação e Evaporação	(2) <i>Wetlands</i> ; Trat. biológico; Tecnologia de membrana.	(2) Filtração; Tratamento biológico entre outros.
(3) Biogás; Condicionamento do solo.	(3) Fertilizantes líquidos ou sólidos	(3) Irrigação; reuso direto entre outros.	(3) Fonte de água

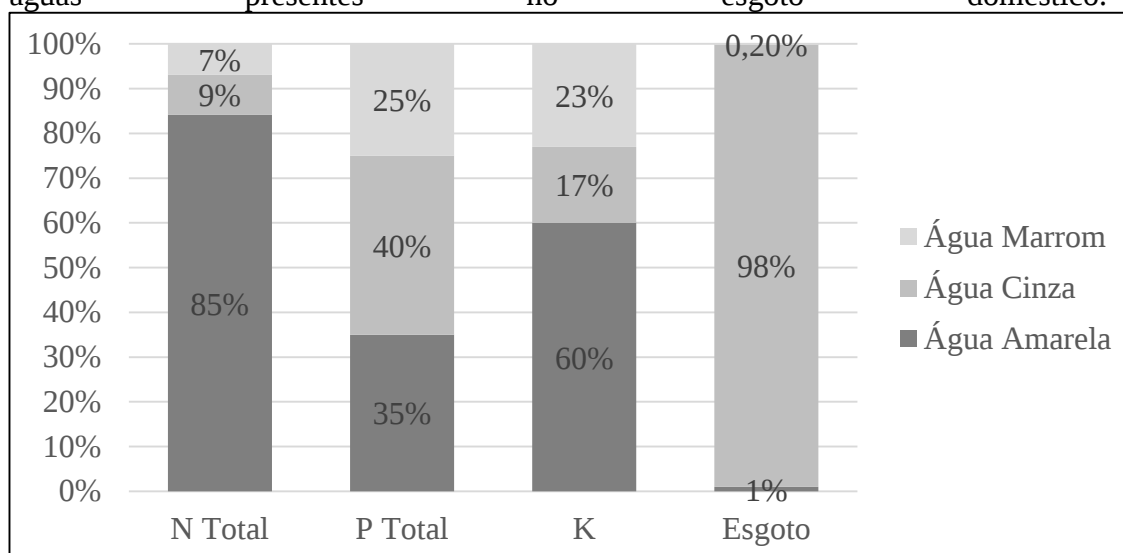
Fonte: Adaptado WERNER, C. et al (2003).

O processo de higienização das águas marrons (fezes) deve ser criterioso devido à quantidade elevada de patógenos. As águas cinzas (de chuveiros, pias e outros usos domésticos), apesar de não possuírem problemas de higienização, ainda não é

possível obter os nutrientes a partir de tratamento simplificado. Em contrapartida, tem-se que as águas amarelas (urina), além de terem risco baixo de contaminação, contém maior proporção de nutrientes disponíveis para as plantas e as maiores ressalvas estão na presença de fármacos (WERNER, C et al; 2003).

A urina representa apenas 1% do fluxo total das águas residuárias no sistema de efluentes doméstico, em contrapartida contém a maior parcela de nutrientes (HANÆUS; HELLSTRÖM; JOHANSSON, 1997). O Gráfico 1 elucida a porcentagem de nitrogênio, fósforo e potássio presentes nas águas cinzas, marrons e amarelas, e a quantidade de contribuição dessas águas no esgoto doméstico total.

Gráfico 1 – Porcentagem de nutriente de acordo com sua origem e quantidade total das águas presentes no esgoto doméstico.



Fonte: Adaptado JOHANSSON, M. (2001).

Esses nutrientes podem vir a ocasionar problemas como: incrustações e corrosão em tubulações, devido ao processo natural de precipitação; aumento nos custos para remoção das incrustações; e possíveis processos de eutrofização de corpos hídricos.

Na presença de cálcio, magnésio, fosfato e carbonato, os principais precipitados que podem vir a se formar no esgoto doméstico são: hidroxiapatita, bruxita, estruvita, magnesita, calcita, dolomita entre outros.

A utilização da urina na agricultura necessita de etapas de tratamento para evitar a contaminação com resíduos fecais (patógenos). Os processos de tratamento comumente usados para a urina são: estocagem em reservatórios fechados por

determinado período de tempo, redução de volume a partir da concentração e precipitação de cristais (estruvita e hidroxiapatita).

Atualmente, utilizam o processo de estocagem para inativar os patógenos, de forma a elevar o pH da urina, em torno de 6,0, a valores superiores a 8,5, em temperatura ambiente e armazenamento por aproximadamente seis meses antes da aplicação, garantindo assim a inativação (ZANCHETA, 2007). Esse processo ocorre em recipiente fechado e escuro, para evitar o contato com pessoas e animais e possíveis contaminações externas.

Em recipiente aberto, há a liberação da amônia e do bicarbonato por evaporação, que acarreta no aumento de pH, e por consequência ocorre a geração de cristais inorgânicos como a estruvita ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$), calcita (calcários utilizados para produção de cal e cimento - $CaCO_3$) e hidroxiapatita (fosfato de cálcio cristalino utilizado em enxertos ósseos - $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$), bem como maus odores e perda de nitrogênio (KVARNSTRÖM et al., 2006).

Ao transformar a urina em subproduto, há ressalvas também quanto à presença de fármacos. Segundo Ronteltap, Maurer e Gujer (2007), ao precipitar a estruvita proveniente da urina, estima-se que 98% dos desreguladores endócrinos permaneçam em solução no sobrenadante. Além disso, segundo os autores, a presença de metais pesados encontrados na urina é inferior aos fertilizantes e adubos comercialmente disponíveis, fazendo com que não haja metais pesados nos cristais inorgânicos precipitados.

Avaliando o tratamento da urina pela precipitação de cristais, têm-se a formação da estruvita. No cenário internacional, as pesquisas com o objetivo de recuperar estes nutrientes se intensifica na década de 80, porém no Brasil as pesquisas na área de recuperação de nutrientes a partir da precipitação de estruvita se intensificaram somente na última década.

As principais pesquisas de remoção e/ou recuperação de nutrientes em forma de precipitação de estruvita no Brasil, utilizaram como materiais: lixiviado de aterros sanitários (MOREIRA, 2009; CAMARGO, 2012), lixiviado de aterro de resíduos sólidos (DINIZ, 2010), efluente de suinocultura (FOLLETO et al, 2013a), adsorvente para tintura de couro a partir de soluções aquosas (FOLLETO et al, 2013b), resíduos de indústria de bebidas de cola (FOLLETO et al, 2013c), sobrenadante bruto do processo de digestão anaeróbia de lodo de esgoto (XAVIER et al, 2014), água sintética composta por fosfato de potássio, cloreto de amônio e cloreto de magnésio (LIRA,

2012), efluente sintético (CASTRO, 2015), esgoto doméstico (AIDAR, 2012), e urina humana (CARDINALI et al, 2009; AIDAR, 2012; OYAMA, 2013; MEMELLI, 2019; BENÁ FILHO, 2019).

3.1 Principais características quanti-qualitativas da urina humana

A urina é o elemento que representa as águas amarelas e cuja produção média diária é de aproximadamente de 1,5 litros por pessoa variando entre 1,0 e 2,5 litros (RAUCH et al., 2003), podendo variar, também, de homem para mulher, das faixas etárias e da dieta nutricional.

A cor da urina está relacionada à presença de três pigmentos principais: urobilina (laranja), uroeritina (vermelho) e urocromo (amarelo). Todavia alguns corantes presentes em medicamentos e alimentos também podem conferir cor verde, vermelha e outras. Por sua vez, o aspecto turvo ocorre, principalmente, devido à presença de muco e/ou precipitação de cristais amorfos (fosfato e uratos), porém bactérias, hemácias e outros fatores também podem elevar sua turbidez (LOPES, 2004).

O odor típico da urina deve-se aos ácidos aromáticos voláteis e o forte odor de amoníaco está relacionado, principalmente, ao processo natural de transformação bacteriana da uréia em amônia, que também acarreta a elevação do pH da urina. Ressalta-se que, após micção, o pH da urina normalmente, sem interferência medicamentosa ou alterações devido a doenças, varia entre 5,5 e 6,5. As infecções e modificações metabólicas de aminoácidos também podem influenciar no odor da urina (LOPES, 2004).

A urina humana contém 156 a 460 mg/L de fósforo e baixa concentração de metais pesados (GANROT et al., 2007; MORALES et al., 2013). Em situações onde os valores do pH da urina estiverem iguais ou superiores a 10,0, é favorecida a formação de hidroxapatita na presença de uma fonte de cálcio, como por exemplo o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) (PENETRA, 1998).

Segundo Shih e Yan (2016), a concentração de fósforo na urina é muito superior à do sobrenadante de lodo digerido anaerobicamente, o que torna a recuperação de fósforo da urina mais viável e econômica do que a recuperação em outras formas de águas residuárias. No Nepal, a obtenção de nutrientes provenientes da urina com a recuperação da estruvita foi demonstrada em escala piloto sem

necessidade de pré-tratamentos (RONTELTAP; MAURER; GUJER, 2007; GELL et al., 2011).

A urina é considerada estéril por muitos pesquisadores, sendo utilizada como uma terapia a partir da ingestão, conhecida como urinoterapia. Devido à baixa presença de microrganismos e, normalmente, ausência de patógenos transmissores de doenças entéricas a outros indivíduos, o risco de transmissão ambiental de doenças é praticamente inexistente (HÖGLUND et al., 2002; JOHANSSON, 2001 e SCHÖNNING; LEEMING; STENSTRÖM, 2002). Assim sendo, é devido a contaminação com resíduos fecais, o maior risco de contágio de patógenos.

Mesmo ocorrendo a absorção e reabsorção de fármacos dentro do organismo humano, uma parte é eliminada pelo trato urinário, todavia, ainda não há um delineamento dos possíveis impactos destas substâncias no uso agrícola. Sabe-se que com relação a grande maioria dos desreguladores endócrinos o risco é baixo considerando o potencial dos microrganismos do solo de degradar quaisquer substâncias orgânicas (PALMQUIST e JÖNSSON, 2004; JÖNSSON et al. 2005; LUCAS e JONES, 2009; WINKER et al., 2010 e ZANCHETA, PENA e GONÇALVES, 2015). Todavia alguns desreguladores endócrinos em baixas doses podem vir a ocasionar problemas ambientais.

Os desreguladores endócrinos são divididos basicamente em naturais e sintéticos. Dentre os estrogênios naturais com alta estrogenicidade estão a Estrona, 17β -estradiol e estriol, e o sintético, 17α -etinilestradiol. Esses acarretam em problemas ambientais mesmo em baixas doses, são resistentes à biodegradação (MIERZWA, AQUINO e VERAS, 2009) e são uma das principais preocupações atuais no tratamento de água convencional. Dentre os estrogênios sintéticos, destaca-se o 17α -etinilestradiol que é encontrado em contraceptivos e além de possuir alta estrogenicidade, é persistente à biodegradação (RAIMUNDO, 2007).

Segundo Liu et al. (2013), os principais componentes presentes na urina humana em mg/L são: $\text{Na}^+ = 2600$; $\text{K}^+ = 2000$; $\text{PO}_4^{3-} - \text{P} = 344$; $\text{NH}_4\text{-N} = 4250$; $\text{SO}_4^{2-} = 1500$; $\text{CO}_2^{3-} = 5448$; e $\text{Cl}^- = 3800$. O N, K e o P são valiosos para aplicação como fertilizantes se recuperados. Em forma de precipitação de cristais, para formar a estruvita, são necessários cerca 500 litros de urina para gerar aproximadamente 1kg do mineral (ETTER, 2009).

O líquido filtrado (sobrenadante) do processo de obtenção da estruvita é onde reside a grande parcela dos micropoluentes, inclusive os desreguladores endócrinos.

Desse modo a quantidade desses micropoluentes na estruvita é baixa, minimizando o risco de contaminação no solo se utilizada como fertilizante (ESCHER et al., 2006; BENETTO et al., 2009).

3.2 Precipitação de estruvita na urina humana

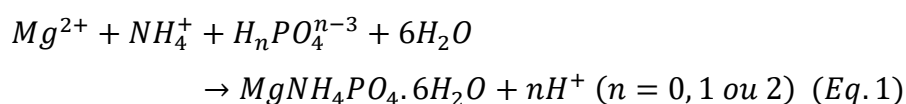
A precipitação de estruvita na urina humana ocorre, inicialmente, a partir do processo de hidrólise da ureia, na qual a enzima urease converte a ureia em amônia e dióxido de carbono e, posteriormente, em amônio e bicarbonato (UDERT; LARSEN; GUJER, 2003).

O processo de urease é o fator inicial para precipitação da estruvita, porém, é o pH que ocasiona as reações, determinando a sua formação. A etapa física é composta pela nucleação e o crescimento de cristais, a etapa química é dependente da força iônica, pH, alcalinidade e temperatura da amostra (CASTRO, 2014; METCALF; EDDY, 2016).

Os principais fatores intervenientes na formação da estruvita são pH, grau de saturação, temperatura e presença de outras soluções de íons como o cálcio, por exemplo (BOUROPOULOS e KOUTSOUKOS, 2000). Uma solução alcalina, com pH entre 8,0 e 10,0 e com níveis de fosfatos (PO_4^{3-}), amônio (NH_4^+) e magnésio (Mg^{2+}) nas concentrações equimolares (1:1:1) favorecem a eficácia da cristalização da estruvita segundo Prabhu e Mutnuri, 2014.

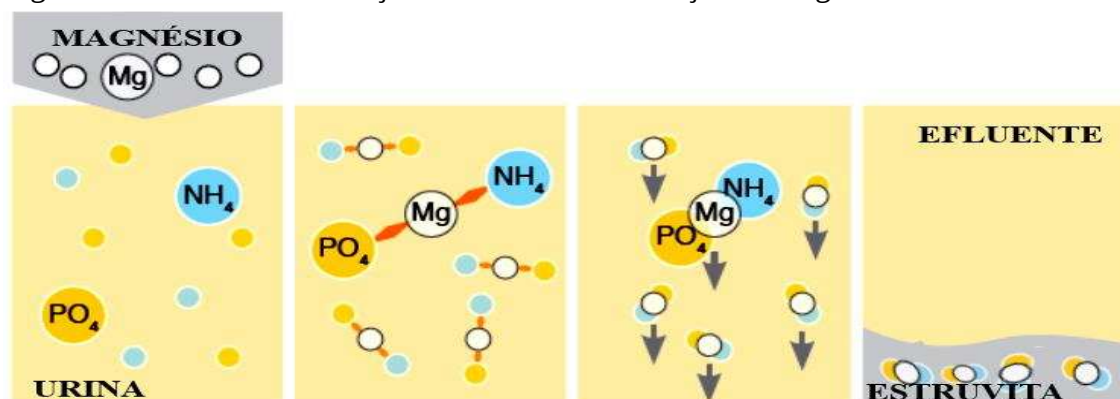
3.2.1 Propriedades químicas e físicas da estruvita

A estruvita (fosfato de amônio e magnésio hexahidratado) é um tipo de mineral ortofosfato que é precipitado por íons magnésio, amônio e fosfato em proporções molares iguais através da seguinte reação (Equação 1):



A Figura 2 representa graficamente o processo de formação de estruvita com adição de magnésio.

Figura 2 – Processo de obtenção de estruvita com adição de magnésio

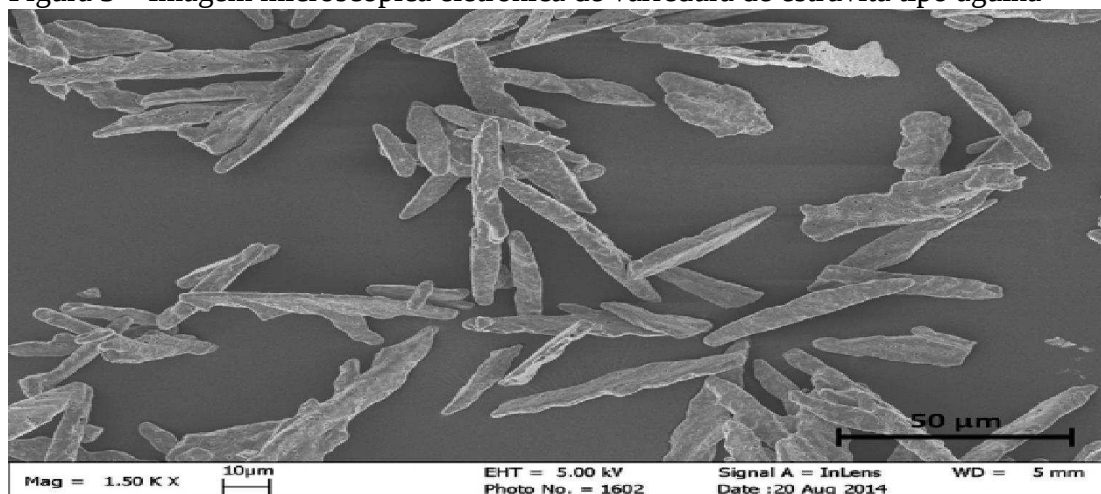


Fonte: Adaptado de ETTER (2011).

Esse fosfato de amônio e magnésio hexahidratado, estruvita, possui baixa solubilidade em água, porém é solúvel em ambientes ácidos (OHLINGER; YOUNG; SCHROEDER, 1998; LE CORRE et al., 2009), com Kps em torno de 13, segundo Ronteltap, Maurer e Gujer (2007). Devido a esta característica, a possibilidade de poluir o meio ambiente por eutrofização é baixa, mesmo que com alta adição de estruvita ao solo (KATAKI et al, 2016; SHU et al 2006). Assim sendo, pode ser considerada um fertilizante de liberação lenta.

A morfologia das partículas da estruvita tem semelhanças com um pó branco que difere de suas características em condições de formação e tem aspecto similar a uma agulha precipitada com Mg^{2+} , NH_4 , e PO_4^{-3} a pH 7,5 (SHIH e YAN; 2016). Observa-se, na Figura 3, o formato tipo agulha da estruvita obtida através de imagem de microscopia eletrônica de varredura.

Figura 3 – Imagem microscópica eletrônica de varredura de estruvita tipo agulha



Fonte: Shih e Yan (2016).

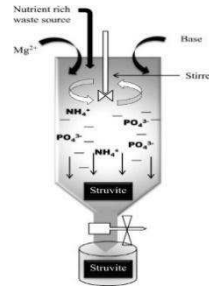
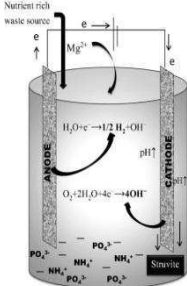
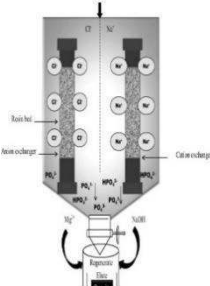
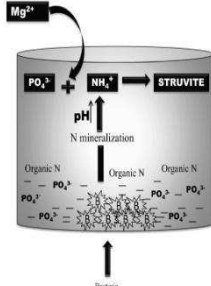
3.2.2 Principais tecnologias usadas na obtenção de estruvita

Uma das formas mais viáveis de obtenção da estruvita é a adição de produtos químicos para remoção de substâncias dissolvidas e em suspensão, em que o precipitado formado pode ser removido ou recuperado por sedimentação, também chamado de precipitação. Segundo Kataki et al. (2016), o método mais utilizado para recuperação de nutrientes da urina em forma de estruvita é a precipitação química, pois os demais métodos, como eletroquímica, separação por troca iônica e biomineralização exigem instalações de maior custos de demanda de energia entre os métodos.

A avaliação dos métodos de obtenção da estruvita é apresentada no Quadro 1 com as especificações inerentes a cada método: desempenho, vantagens e limitações de cada abordagem, dentre outros parâmetros.

Os principais tipos de reatores utilizados para recuperação de nutrientes como estruvita e suas condições operacionais estão dispostos no Quadro 2. Entre os reatores, o reator de batelada manual apresentou melhor resultado em recuperação de fósforo, chegando a uma eficiência de 100%, segundo Kataki et al. (2016).

Quadro 1 – Métodos de produção de estruvita

Especificações	Precipitação química	Depósito eletroquímico	Troca de iônica	Biomíneralização
Representação esquemática				
Princípio	Precipitação de P e NH_4^+ em solução com adição de Mg e mistura	Deposição de estruvita em um cátodo em uma solução contendo Mg, PO_4^{3-} , NH_4^+ a partir de reação eletroquímica	P e NH_4^+ são trocados em permutadores de íons e precipitados como estruvita após a adição de Mg	Precipitação através de biomíneralização em meio contendo PO_4^{3-} e Mg, utilizando NH_4^+ do metabolismo de N por micróbios
pH	Aditivo químico (NaOH, KOH)	Alcalinidade auto-estabelecida	Aditivo químico (NaOH)	Alcalinidade auto-estabelecida
Processo	Agitação, fluidização	Agitação, fluidização	Não aplicável	Não aplicável
Reator	Batelada, leito fluidizado	Célula eletroquímica	Coluna de permuta iônica	Cultura em lote
Limitação	1. Co-precipitação de impurezas como sal	1. Co-precipitação de impurezas	1. Co-precipitação de impurezas	1. Co-precipitação de impurezas
	2. Cristalização ineficaz pode não atender às condições adequadas	2. Uso de material dispendioso como Pt	2. Regeneração de resina a intervalos regulares	2. Precipitação lenta
	3. Produção de resíduos	3. Formação de escamas no cátodo	3. Disponibilidade limitada de trocadores aniônicos específicos para sorção PO_4^{3-}	
Vantagem	Fácil de instalar, operar Não emprega o uso de equipamentos sofisticados	Não há necessidade de adição de alcalinizante, produção simultânea de potencial H_2 de combustível	Precipitação rápida	Nenhuma adição externa de alcalina
Instalação	Escala real / laboratorial	Escala laboratorial	Escala laboratorial	À escala laboratorial
Demonstração	Em reais (estrupe, urina, lodo, cinzas) e resíduos sintéticos	Em escala real (lodo, digerido) / resíduos sintéticos	Em resíduos sintéticos	Em resíduos sintéticos
Grande parte do custo	Fonte alcalina e uma fonte de Mg	Material de cátodo e energia elétrica	Resina de permuta iônica	Fonte de Mg

Fonte: Adaptado de Kataki et al. (2016)

Quadro 2 – Tipos de reatores empregados para recuperação de nutrientes como estruvita e condições operacionais

Tipo de reator	Total P (mg/L)	PO₄ -P (mg/L)	TN (mg/L)	NH₄-N (mg/L)	Ca (mg/L)	Fonte de Mg	Químico adicional	pH	Ajuste de pH	P recuperado (%)	NH₄⁺recuperado (%)	Referência
Reator em batelada de vidro	NR	240	NR	6963	28	MgCl ₂	-	9,0	-	96	NR	Ronteltap; Maurer; Gujer (2007)
Reator de leito fluidizado	NR	460	NR	40	234	MgO, MgCl ₂	-	9.4	NaOH	95	NR	Wilsenach, Schuurbijs e van Loosdrecht (2007)
Stirred beaker	NR	206	NR	7220	NR	MgCl ₂	Na ₂ HPO ₄	8,0, 11,0	NaOH	85	95	Liu et al. (2008)
Reator em batelada manual	400	NR	300	NR	NR	MgO	-	9.2, 9.5	-	95-100	50	Ganrot et al. (2007)
Reator tanque agitado contínuo	NR	197	NR	2540	16	Ânodo Mg	-	8.9	-	84	NR	Hug and Udert (2013)
Reator tanque agitado	NR	156-194	NR	3200-4990	NR	MgO	-	9.1, 9.3	-	95	NR	Morales et al. (2013)
Reator batelada fechado	NR	416	NR	245	NR	MgO, MgCl ₂	-	9,0	NaOH	92	90	Latifian, Holst e Liu (2013)

Fonte: Adaptado de Kataki et al. (2016). NR: Não relatado.

3.2.3 Principais fontes de magnésio usadas na obtenção de estruvita

Segundo Kataki et al. (2016), as principais fontes de magnésio para precipitação de estruvita relatadas na literatura são cinzas de madeira, magnesita, água do mar, salmoura, magnésia e subproduto da produção de MgO (magnesita em decomposição).

No Quadro 3 apresenta-se uma lista de alguns estudos que utilizaram a urina humana para a precipitação de estruvita e as fontes de magnésio empregadas, bem como a relação de magnésio e fósforo, o valor de pH, eficiência de recuperação de fosfato e as principais conclusões a respeito desta fonte de magnésio.

Quadro 3 – Estudo conduzidos para precipitação de estruvita a partir da urina humana

Fonte de Mg	Mg (g/Kg)	Mg: P	pH	(%) Fosfato recuperado	Principais conclusões	Referência
Salmoura (bitter)	27.500	1,1: 1	NR	98	Mais econômico em áreas costeiras	Etter et al. (2011)
Magnesita	244	1,1:1	NR	90	Mais barato do que o resíduo de sal e o $MgSO_4$	Etter et al. (2011)
Cinza de madeira	34	2,7: 1	8,8	99	Presença de impurezas, como a calcita, e metal pesado no produto	Sakthivel et al. (2011)
Óxido de Magnésio	NR	1,5:1	9,1 e 9.6	98	Eficiência alta para recuperação de fósforo, tanto em urina diluída quanto não diluída	Antonini et al. (2011)
Cloridrato de Magnésio	NR	3:2	9	98	Fonte de Mgé eficiente na recuperação de fósforo	Ronteltap et al. (2007)

Fonte: Adaptado de Kataki et al. (2016). NR – Não relatado.

Todavia, estudos para outras fontes de magnésio são essenciais para a contribuição neste cenário econômico, principalmente fontes de fácil aquisição e valor econômico baixo. Neste contexto, vem ganhando destaque a *Moringa Oleifera*, usada principalmente no processo de remoção de cor e turbidez no tratamento de água potável, atuando como coagulante e/ou floculante (RAMOS; PATERNIANI; ZUMERLY, 2008; OLIVEIRA et al., 2018; VALVERDE et al., 2018; VIRK et al., 2019). A semente da *Moringa oleifera* possui cerca de $6,35 \times 10^{-3} \pm 8.66$ mg/g de magnésio

(GOPALAKRISHNAN, DORIYA e KUMAR, 2016), representando um potencial como aditivo na recuperação de fósforo da urina humana.

3.3 Estruvita de urina humana aplicada na agricultura

Diversas técnicas têm sido estudadas para tratamento e extração de nutrientes da urina objetivando sua reciclagem na agricultura, tais como: estocagem da urina em recipiente fechado; evaporação da urina; precipitação da estruvita; e congelamento-descongelamento da urina. As referências sobre aplicação do fertilizante obtido por precipitação de estruvita de urina humana estão dispostas no Quadro 4.

Quadro 4 – Aplicação de estruvita proveniente de urina humana em cultivos

Cultivo planta	Tipo de análise	Adubo químico usado	Tipo de solo / material	Efeito da estruvita na cultura / planta	Observação	Referência
Milho	Campo	Super - fosfato triplo	Sandy loam (Ando-solo)	Não há diferença significativa no rendimento a seco em comparação com o fertilizante	Efeito semelhante ao fertilizante químico, P na estruvita não é limitante para a planta	Gell et al. (2011)
	Pequena parcela	Fosfato de diamônio	NR	Diâmetro e altura de folha semelhantes com fertilizante químico	Comparável ao fertilizante químico	Dalecha et al. (2012)
Trigo (Triticum aestivum L.)	Câmara climática em potes	Mistura NPK (14-4-21)	Areia de quartzo	Mais baixo que o peso seco (em 50%) do que o fertilizante químico	Baixa disponibilidade e de nutrientes (N) comparado ao fertilizante químico	Ganrot et al. (2007)

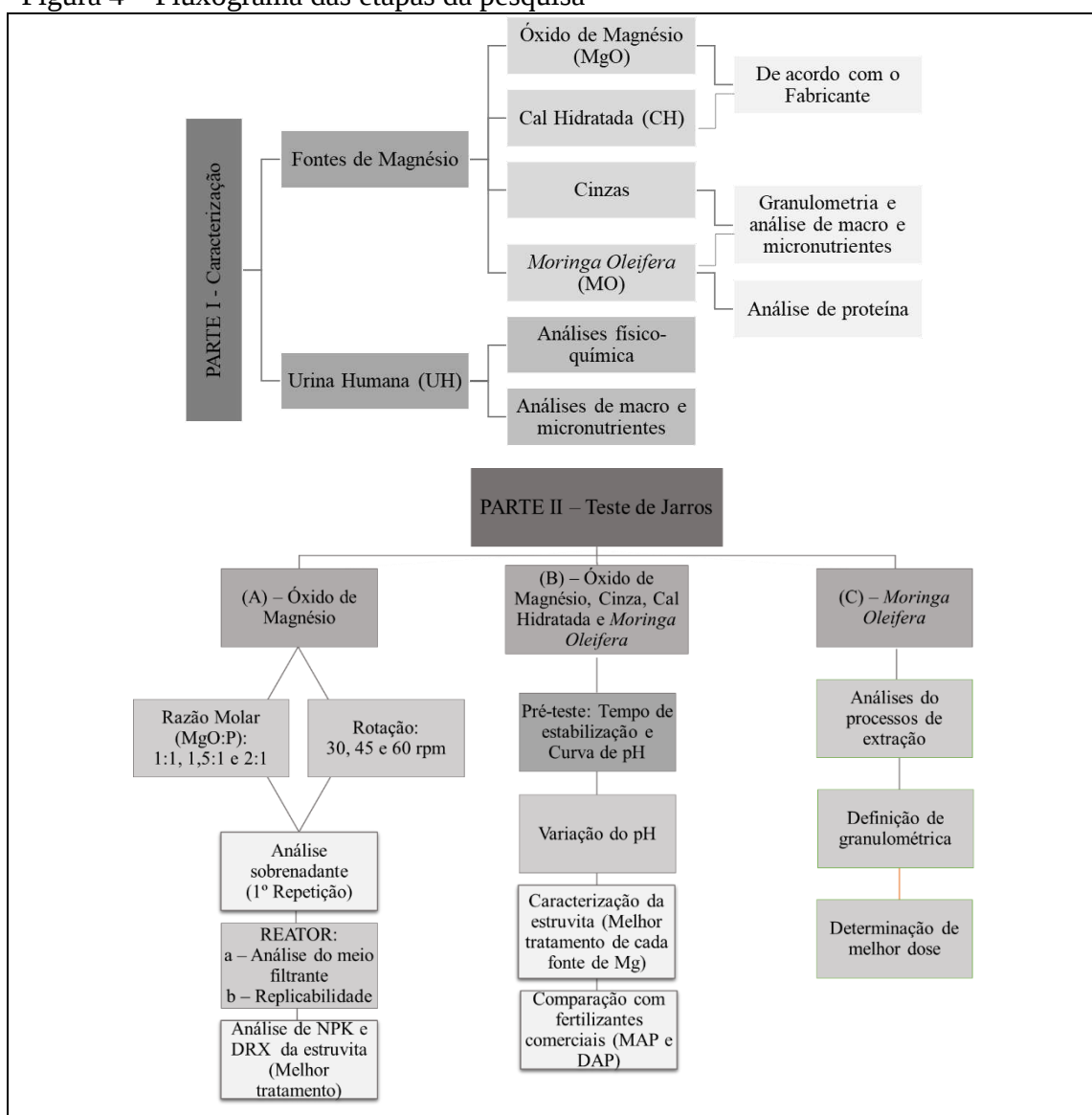
NR – Não Relatado. Fonte: Adaptado de Kataki et al. (2016).

Deste modo, nota-se que a estruvita se comporta de maneira similar aos demais fertilizantes químicos. Deve-se, então, aproveitar os nutrientes da urina humana, transformando, a estruvita, em um subproduto. Assim, a recuperação de fósforo a partir da urina humana na forma de estruvita é uma alternativa eficaz e promissora.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram conduzidos nos laboratórios de Engenharia Sanitária e Ambiental (LESA), de Resíduos da Indústria Florestal e no de Meio Ambiente de Celulose e Papel (LCP), da Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa – Minas Gerais. O estudo avaliou diferentes fontes de magnésio para a recuperação de nutrientes da urina humana (UH) a partir da precipitação de estruvita. As etapas estão apresentadas no fluxograma da Figura 4 e descritas a seguir.

Figura 4 – Fluxograma das etapas da pesquisa



Fonte: Autora.

Primeiramente, caracterizou-se a urina humana fresca¹ e as quatro fontes de íons de magnésio: óxido de magnésio (MgO), cinzas, cal hidratada (CH) e Moringa Oleífera (MO), e em seguida, realizaram-se testes de jarros seguindo diferentes etapas:

- A. Definição, utilizando óxido de magnésio, da melhor dose e melhor velocidade de rotação para recuperação de fósforo total. Teste da replicabilidade em protótipo de reator de precipitação de estruvita;
- B. Análise, com quatro fontes diferentes de íons de magnésio, a relação entre quantidade de material e pH para recuperação de fósforo total e comparação entre os melhores resultados com fertilizantes comerciais fosfatados; e
- C. Avaliação de diferentes formas de extração de Moringa oleífera e o seu efeito na recuperação de fósforo.

4.1 Coleta e caracterização da Urina Humana

As amostras de urina humana foram coletadas em garrafas plásticas e em um vaso sanitário segregador de urina e fezes (instalado no banheiro do Laboratório de Resíduos da Indústria Florestal), higienizado com solução hipoclorito de sódio (Figura 5).

Destaca-se que o vaso sanitário, apesar de ser segregador, foi utilizado apenas para a coleta de urina. As amostras compostas foram homogeneizadas em recipientes de 20 litros, analisadas e processadas em seguida.

Figura 5 – Recipientes de coleta de urina. (A) Garrafas plásticas tipo pet. (B) Vaso sanitário segregador de urina e fezes.



Fonte: Autora.

Os parâmetros físicos e químicos de caracterização da urina humana coletada, bem como as metodologias utilizadas para as análises estão descritos no Quadro 5.

¹ Considerou-se urina fresca aquela na qual o tempo de coleta foi inferior a 60 horas.

Realizou-se a análise quantitativa de metais (Ca, Cu, Fe, K, Mg, Mn e Na) de acordo com o método de espectroscopia de absorção atômica TAPPI T266 om-02 (TAPPI, 2006).

Quadro 5 – Parâmetros analisados para caracterização da urina fresca e as respectivas metodologias¹ utilizadas.

Parâmetro	Metodologia
Condutividade elétrica	2510 A
Cor	2120 B
Demanda biológica de oxigênio - DBO ₅ (mg/L)	5210 B
Demanda química de oxigênio - DQO _{total} (mg/L)	5220 D
Fósforo Total	4500-P D
Nitrogênio Amoniacal (mg/L)	4550-NH ₃ C
Nitrogênio Total Kjeldahl (mg/L)	4500-N _{org} B
pH	4500-H ⁺ B
Temperatura (°C)	2550 B
Turbidez (NTU)	2130 B

Fonte: Autora. ¹ Métodos de acordo com SMEWW (APHA/AWWA/WEF, 2012).

4.2 Caracterização dos materiais fontes de magnésio

Os materiais testados como fontes de íons de magnésio: óxido de magnésio (MgO), cal hidratada, cinza e Moringa oleífera (MO), foram selecionados considerando o seu potencial de alcalinização e presença de magnésio. A caracterização do óxido de magnésio e da cal hidratada foram de acordo com as especificações dos fabricantes.

Para as cinzas, oriunda da queima de biomassa de madeira de eucalipto, e Moringa Oleífera, a caracterização foi feita através da quantidade de N-Total pelo método Kjeldhal (4500-N_{org} B), de acordo com o Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater – APHA/AWWA/WEF, 2012.

Determinaram-se, de acordo com APHA et al., (2012) os macro e micronutrientes (N, P, Ca, Cu, Fe, K, Mg, Mn, S, Zn, B, Ni, Mo e Na), por extração em ácido nítrico, e análise em Plasma Acoplado Indutivamente de Espectrometria de Emissão Óptica (ICP-OES), no Laboratório de Fertilizantes do Departamento de Solos da UFV.

A concentração de proteína presente nas sementes de MO foi determinada conforme método Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 2000). A granulometria das cinzas e das sementes de MO foram verificadas de acordo com o método de peneiramento descrito na NBR-7181 (ABNT, 1984).

4.3 Ensaios preliminares: tempo de estabilização e alcalinização

Os ensaios preliminares para determinação do tempo de estabilização dos valores de pH e do potencial de alcalinização para cada fonte de magnésio (óxido de magnésio (MgO), cal hidratada, cinza e Moringa oleífera (MO))) foram realizados com auxílio de um pHmetro de bancada.

Determinou-se, primeiramente, o tempo necessário de estabilização do pH das fontes de magnésio, submetendo as amostras à agitação, em agitador magnético, de 100 rpm até pH constante. Para tal, utilizaram-se 100 mL de urina com duas quantidades, 0,5 e 1,0 g de cada fonte de magnésio de acordo com método adaptado de Mäkitalo et al. (2014).

Para elaboração da curva de pH, utilizou-se o tempo de estabilização, como tempo mínimo para cada nova dosagem, permitindo assim determinar a relação entre quantidade das materiais fontes de magnésio e pH. Os materiais foram acrescentados até que se atingisse pH 10,0.

4.4 Determinação das condições ótimas de precipitação de estruvita – Teste de Jarros

A determinação das condições ótimas de precipitação da estruvita foi realizada em etapas: (A) Avaliação da melhor relação de velocidade de rotação e dose com óxido de magnésio; (B) Teste de diferentes fontes de íons magnésio (óxido de magnésio, cal hidratada, cinzas e Moringa Oleífera); e (C) Análise de diferentes formas de extração da moringa oleífera.

Para todos os testes de jarros, a urina fresca e o sobrenadante (pós tratamento), foram submetidos à análise de fósforo total, de acordo com SMEWW (APHA/AWWA/WEF, 2012), e temperatura (°C), pH e condutividade (mS/cm) com o auxílio do equipamento da sonda multiparâmetro AKSO/AK88.

4.4.1 Definição dos parâmetros: velocidade de rotação e dose do coagulante

A determinação dos parâmetros de velocidade de rotação e dose com óxido de magnésio (Figura 6) foram adaptadas de Barbosa et al. (2016). Para tal, aplicou-se óxido de magnésio (MgO P.A– 98%) como coagulante no equipamento JarTest (Teste de

jarros), onde foram adicionados 1000 mL de urina por jarro, sendo fixados o tempo de agitação em 10 min e de sedimentação em 30 min.

Variou-se a velocidade de agitação em 30, 45 e 60 rpm para as doses de óxido de magnésio (MgO – 98%) nas proporções de 0:1, 1:1, 1.5:1 e 2:1 da relação de Mg:P. Os testes de jarros foram conduzidos em três repetições, sendo que para cada repetição foi realizada uma nova coleta de amostras de urina humana.

4.4.2 Definição do pH ótimo para recuperação de estruvita

Para a definição do pH ótimo para a recuperação de estruvita, variou-se o pH da urina humana a valores de 7,0 à 9,5 com as seguintes fontes de magnésio: Óxido de Magnésio (MgO), cinzas e Hidróxido de cálcio. Considerou-se o tempo e velocidade da mistura rápida de acordo com os resultados obtidos anteriormente. Para a mistura lenta, utilizaram-se os resultados obtidos no item 4.3, onde o tempo de rotação já havia sido fixado em 10 minutos e o tempo de sedimentação em 30 minutos.

Realizou-se um segundo teste, com os mesmos critérios, porém com à adição de 1 g de MgO, verificando-o como fator limitante para recuperação do fósforo.

4.4.3 Recuperação de fósforo com Moringa Oleifera

Aplicaram-se diferentes métodos de extração e concentração de Moringa oleifera como coagulante no equipamento JarTest, sendo testados em 1000mL de urina por jarro. As diferentes abordagens estão sintetizadas no Quadro 6.

Quadro 6 – Métodos de preparo da Moringa oleifera e processos utilizados no teste de jarros

Teste	Preparo da Moringa oleifera		Teste de Jarros			
	Modo de preparo	Tamanho das partículas _d	Velocidade e tempo de Mistura		Tempo de Sedimentação	Doses / Concentração de Moringa (mg/L)
			Rápida	Lenta		
1	Moído na almofariz	SD	60 rpm por 10 minutos _a		30 minutos _a	100.000; 30.000; 5.000; e 3.000
2	Moído na almofariz e mantido por 24 horas em estufa a 40°C.					
3		Abertura em mm = 0,149	100 rpm por 3 minutos _b	15 rpm por 15 minutos _b	60 minutos _b	100; 250; 500; 750; 1000; e 2000 _b
4		Abertura em mm = 0,297				
5		Abertura em mm = 0,590				
6		SD				
7	Extrato da trituração da semente com solução de NaCl 1mol/L	< 1 mm*	160 rpm por 30 segundos _c	15 rpm por 15 minutos _c	2 horas _c	100; 250; 500; 750; 1000; e 2000

Fonte: Autora.SD – Sem Diferenciação. * Filtrada em malha de 1mm. Referências: a. Adaptado de BARBOSA et al. (2016). b. Adaptado de MATOS et al. (2014). c. Adaptado de LO MONACO et al. (2012).

4.5 Análise do sobrenadante dos testes de jarros do processo de precipitação de estruvita

A estruvita foi recuperada através da filtração do conteúdo dos jarros, pós teste de Jarros, em filtros reutilizáveis de tecido e seco ao ar livre, conforme apresentado na Figura 6.

Figura 6 Etapa de filtração após teste de jarros no processo de recuperação da estruvita



Fonte: Autora.

As amostras do sobrenadante, após a primeira repetição do teste de jarros, foram caracterizadas de acordo com os parâmetros físico-químicos realizados para a caracterização da urina bruta objetivando avaliar a necessidade de um pós-tratamento.

4.6 Análise do precipitado do processo de precipitação de estruvita

Os precipitados, do processo de precipitação de estruvita, do melhor resultado das etapas de definição da velocidade de rotação e razão molar e da etapa seguinte de determinação do pH ótimo, foram submetidos à análise de difração de raios-X, para cada material, para averiguação das características morfológicas no laboratório de Microscopia Eletrônica do Departamento de Física da UFV.

O precipitado do melhor resultado da etapa de decisão da velocidade de rotação e razão molar foi submetido à análise de nitrogênio total (N), fósforo total (P), pentóxido

de difósforo (P_2O_5), potássio total (K) e óxido de potássio (K_2O), segundo as normas do Ministério da Agricultura (Inst. Normativa 28, 2007). As análises foram realizadas no laboratório de análise de solo, tecido vegetal e fertilizante, do Departamento de Solos da UFV.

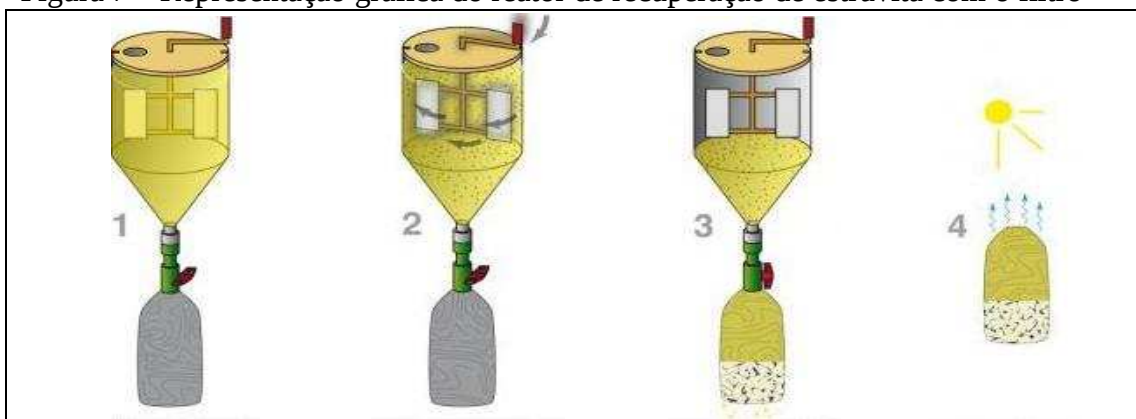
Os precipitados, da etapa de determinação do pH ótimo, para cada material, foram submetidos à análise de nitrogênio total, de acordo com o APHA/AWWA/WEF (2012). Os macro e micronutrientes totais e disponíveis (N, P, Ca, Cu, Fe, K, Mg, Mn, S, Zn, B, Ni, Mo e Na) foram extraídos das amostras em ácido nítrico e água destilada, e analisados em plasma acoplado indutivamente de espectrometria de emissão óptica (ICP-OES) no laboratório de Fertilizantes do Departamento de Solos da UFV.

Os resultados foram comparados, com relação à concentração de fósforo, nitrogênio, potássio, cálcio e magnésio com fertilizantes fosfatados: fosfato monoamônico (MAP), fosfato diamônico (DAP) e nitrato de amônia e cálcio.

4.7 Sistema de precipitação de estruvita

A obtenção da estruvita foi realizada de acordo com Etter (2009), por meio de um sistema físico-químico por um reator de mistura para recuperação de estruvita, funcionando em batelada de forma manual com os parâmetros ideais encontrados nos testes de jarros. Conforme apresentado na Figura 7, a urina é inserida ao sistema na parte superior do reator (1), subsequentemente, é adicionado o coagulante seguido de agitação da mistura (2). Após decorrido tempo de sedimentação, o líquido passa pelo filtro (3) e sua secagem ocorre ao ar livre (4).

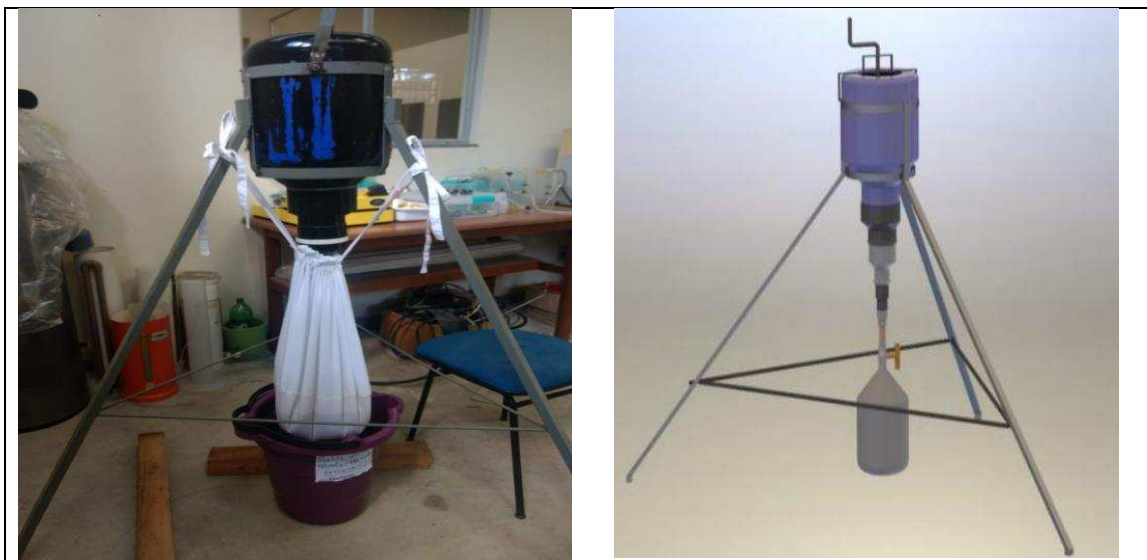
Figura 7 – Representação gráfica do reator de recuperação de estruvita com o filtro



Fonte: ETTER (2009). Nota: 1. Aparato completo. 2. Agitação da mistura. 3. Sedimentação e filtração 4. Secagem.

A Figura 8 apresenta o protótipo construído, constituído de um reator composto por quatro partes distintas: (1) mecanismo de agitação, (2) tanque cilíndrico de polietileno de 20 litros, (3) válvula de descarga de fundo e (4) dispositivo de filtração.

Figura 8 – Protótipo do reator de recuperação de estruvita



Vista completa do reator de recuperação de estruvita. Fonte: Autora.

A definição do melhor meio filtrante, para o dispositivo de filtração do protótipo de recuperação de estruvita, foi feita selecionando quatro tecidos: oxford (100% Poliéster); algodão (100% Algodão); organza (100% Poliamida) e o tecido não tecido feltro (100% Poliéster). Os filtros possuem forma cilíndrica com superfície de filtração de aproximadamente 800 cm² e foram comparados de acordo com método adaptado de Etter (2009), onde:

- a porosidade foi analisada utilizando o microscópio ótico Axiolab LR com uma objetiva de 10x acoplada a uma câmera CMOS da Pixelink PL-A741 no Laboratório de Microfluídica e Fluidos Complexos - Departamento de Física - UFV. A área do poro foi calculada utilizando o software ImageJ.

- a permeabilidade dos filtros foi avaliada pelo método de determinação de sólidos totais (ST) (APHA et al., 2016) no material filtrado, utilizando urina e água destilada para comparação. Filtraram-se 5 mL de urina após etapa de adição de 5mg de MgO, agitação de 60 rpm por 10 min em agitador magnético e 30 min em repouso. Na água destilada, procedeu-se do mesmo modo, porém foram utilizados 50 mL de água destilada e

adicionado 50 mg de MgO. Avaliou-se, desse modo, a porcentagem de retenção de partículas pelos filtros.

Os resultados obtidos nos ensaios preliminares do teste de jarros, que avaliou a melhor relação de dose e velocidade de rotação com adição de óxido de magnésio, foram utilizados para averiguar a replicabilidade do processo de obtenção de estruvita no protótipo de reator. A marcação do tempo de rotação foi realizada manualmente com o auxílio de um cronômetro.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização da urina humana (UH)

A urina humana (UH), material de estudo desta pesquisa, foi caracterizada físico-quimicamente (Tabela 1), afim de avaliar seu potencial para obtenção de seus nutrientes, com o objetivo de recuperar o fósforo, em forma de estruvita, para utilização como fertilizante.

A urina humana, analisada nessa pesquisa, contém fósforo em torno de 549 mg/L, nitrogênio, 5.808,0 mg/L, magnésio 83,0 mg/L e pH de 8,2. Os macro e micronutrientes encontrados na urina humana (Tabela 1) apresentaram valores interessantes, considerando sua recuperação para posterior utilização como fertilizante.

Segundo Cantarow e Schepartz (1967), o aumento do pH, devido a hidrólise da ureia, induz ao processo de precipitação de fosfatos, contribuindo com o aumento da turbidez. Este fato corrobora com os resultados dessa pesquisa e de Botto et al. (2012) (Tabela 1), onde maiores valores de pH também apresentaram maiores valores de turbidez. O aspecto turvo também pode ocorrer devido à presença de muco, bactérias, hemácias e outros fatores (LOPES, 2004).

Todavia, o cloro (22.556 mg/L) e o sódio (1.609 mg/L) podem vir a ser fatores limitantes. O cloro, apesar de ser considerado um micronutriente, tem restrições altas quanto sua aplicação, podendo causar toxicidade, dependendo da tolerância da cultura. O sódio, que apesar de não ser um nutriente, é incluído no cálculo da capacidade de troca de cátions (CTC) do solo, de tal modo que, se ultrapassar o valor de 1% é considerado crítico. Em solos ideais, o valor de sódio, normalmente é zero.

De modo geral, os resultados da caracterização da urina humana, mantiveram-se na faixa dos valores encontrados pelos autores Botto et al. (2012) e Etter et al. (2011) (Tabela 1). No entanto, a quantidade de potássio total, 420 mg/L, dessa pesquisa, foi bem inferior às demais apresentadas na literatura: 1.251 mg/L (BOTTO et al., 2012) e 1.940 mg/L (ETTER et al., 2011).

A quantidade de nutrientes presentes na urina pode variar de homem para mulher, em relação às faixas etárias, a dieta nutricional e devido às possíveis interações medicamentosas (Botto et al., 2012), tornando-se um desafio definir padrões, seja para seu tratamento ou recuperação dos seus nutrientes.

Tabela 1 – Caracterização da Urina humana

Parâmetros	Autora	Botto et al. (2012)				Etter et al. (2011)
Período de Coleta	48 horas	48 horas				24 horas
Tipo de Estocagem	Fechada	Fechada				Fechada
Armazenamento	Ambiente	Ambiente				Ambiente
Faixa etária	Entre 4 a 75 anos	5 a 10 anos	20 a 50 anos	20 a 50 anos	Superior a 60 anos	Entre 6 a 64 anos
Sexo	SDG	Crianças (SDG)	Homens	Mulheres	Idosos (SDG)	8 homens e 6 mulheres
Local da pesquisa	Viçosa – MG/BR	Aquiraz – CE/BR				Siddhipur/Nepal
P-Total (mg/L)	549,0 ± 96	456,0	563,0	524,0	518,0	383,0
NTK (mg/L)	5.808,0	5.552,0	9.701,0	5.736,0	8.008,0	-
N - Orgânico (mg/L)	5098,0	-	-	-	-	-
N- Nitrito	NA	7,3	7,8	4,4	4,8	-
N - Nitrato	NA	0,4	4,5	6,9	0,3	-
N - Amoniacal (mg/L)	719,7 ± 0,1	3.422,0	1.711,0	3.333,0	6.698,0	418,0
K-Total (mg/L)	420,0 ± 1,5	1.251,0	1.416,0	1.012,0	1.343,0	1.940,0
Ca (mg/L)	45,2 ± 0,2	-	-	-	-	74,4
Cl (mg/L)	22.556,0 ± 0,0	11.804,0	10.198,0	11.521,0	12.275,0	6.410,0
Cu (mg/L)	0,3 ± 0,0	-	-	-	-	-
Fe (mg/L)	1,2 ± 0,1	-	-	-	-	-
Mg (mg/L)	83,0 ± 1,5	-	-	-	-	36,9
Mn (mg/L)	0,0 ± 0,0	-	-	-	-	-
Na (mg/L)	1.609,0 ± 21,3	3.000,0	2.400,0	2.304,0	2.328,0	3.270,0
pH	6,0 ± 5	7,9	6,7	7,5	7,8	5,5
Condutividade (mS)	18,2	27,5	19,3	34,7	30,8	23,5
Cor (V.A)	2.402,0	550,0	521,0	549,0	541,0	-
Turbidez (NTU)	33,7	288,0	189,0	486,0	520,0	-
DBO ₅ (mg/L)	13.355,0	-	-	-	-	-
DQO (mg/L)	14.361,0	10.246,0	10.420,0	8.162,0	9.205,0	6.340,0

SDG – Sem distinção de gênero. NA – Não analisado. – Não informado. Fonte: Autora.

5.2 Caracterização das fontes de magnésio

As características dos materiais empregados como fonte de magnésio nos ensaios de precipitação de estruvita: óxido de magnésio, cal hidratada, Moringa oleífera e cinzas, são apresentadas nas tabelas 2 e 3.

O óxido de magnésio possui grau de pureza para análise de 98%. A cal hidratada possui grau de pureza tipo III, de acordo com a NBR 7175 (2003), que trata das especificações da cal hidratada para argamassas – Requisitos, na qual os óxidos totais na base de não-voláteis ($\text{CaO}_{\text{total}} + \text{MgO}_{\text{total}}$) possuem valores iguais e/ou superiores a 88%.

A Moringa Oleífera, pertencente à família Moringaceae, também conhecida como acácia-branca, tem sido empregada amplamente no estudo de redução de turbidez e clarificação da água, na qual o teor de proteína é considerado um aspecto fundamental para a floculação/coagulação no tratamento de redução de turbidez e remoção de cor. Segundo Narasiah, Vogel e Kramadhati (2002), as sementes podem proporcionar diferentes desempenhos de coagulação devido a diferença nas concentrações de proteína e desenvolvimento da semente.

A concentração de proteína bruta na semente de moringa descascada, desta pesquisa, foi de 39,13 dag/kg, próximos aos dos resultados encontrados por Viera (2017) de 30,27 dag/kg, Matos et al. (2014) de 44,07 dag/kg e Ndabigengesere, Narasiah e Talbot (1995) de 36,70 dag/kg (Tabela 2).

Tabela 2 – Nutrientes presentes na semente de Moringa oleífera

Nutrientes (mg/Kg)	Autora	Ngigi e Muraguri (2019)	Zaid e Ghazali (2019)	Vieira (2017)	Mgbemena e Obodo (2016)
B	2,0	-	-	-	-
Ca	822,3	-	394.000,0	1.789,0	29.100,0
Cu	4,1	-	ND	5,2	-
Fe	18,9	284,6	27.800,0	19,4	-
K	6.450,0	15.930,0	382.900,0	4.655,0	6.250,0
Mg	2.455,0	22.293,0	19.900,0	1.527,0	12.770,0
Mn	0,0	93,6	-	14,6	-
Mo	0,0	-	ND	ND	-
N	13.080,0	-	-	-	-
Na	378,7	161,6	-	27,3	8.250,0
Ni	0,0	-	-	ND	-
P	6.452,0	-	49.800,0	-	5.400,0
S	7.348,0	-	82.900,0	-	-
Zn	49,2	51,0	ND	55,4	-

ND – Não detectado. – Não especificado. Fonte: Autora.

A quantidade de magnésio presente foi de 2.455 mg/kg inferiores aos valores encontrados na literatura, 19.900 mg/kg (ZAID; GHAZALI, 2019), 22.293,2 mg/kg (NGIGI; MURAGURI, 2019), 1.527,8 mg/kg (VIERA, 2017), notando-se uma variação na quantidade presente de magnésio nas sementes de *Moringa oleifera*.

Todavia, ressalta-se que as características de quaisquer sementes dependem da maturação, fatores ambientais, modo de colheita, secagem e processamento (RAJJOU et al., 2012). Além disso, também deve-se levar em consideração o modo de transporte e armazenamento, que podem afetar a qualidade das sementes devido à presença de determinados fungos e/ou insetos acarretando perda nutricional e variações no peso e capacidade de germinação (DANIELSON, 1991).

A cinza vegetal² utilizada provém da queima da biomassa de madeira de eucalipto. Segundo Voundinkana, Demeyer e Verloo (1998), dependendo da fertilidade do solo e da necessidade da cultura, as cinzas vegetais podem ser utilizadas como adubo e/ou corretivo devido aos teores elevados de potássio, fósforo, cálcio e magnésio. Os nutrientes presentes na cinza vegetal estão dispostos na Tabela 3.

Tabela 3 – Nutrientes presentes na cinza vegetal

Nutrientes (mg/kg)	Autora	Sakthivel, Tilley e Udert (2012)	Pedersen (2003)	Huang et al. (1992)	Etiegni et al. (1991)
B	163	-	-	127	8
Ca	>300.000	274.000	237.025	109.400	317.400
Cu	114	1.050	-	78	145
Fe	875	6.090	7.390	3.300	19.500
K	33.940	74.600	59.725	28.600	41.300
Mg	19.960	34.200	44.225	16.200	22.500
Mn	2.742	19.300	-	3.470	6.693
Mo	0,57	-	-	-	114
N	2.537	<0.7	-	900	600
Na	17.850	5.160	-	1.600	3.400
Ni	19	49	37	12	47
P	13.160	16.600	-	6.900	14.000
S	2.952	12.300	-	6.800	4.455
Zn	238	2.670	-	794	700

– Não especificado. Fonte: Autora.

² Cinza vegetal é um resíduo proveniente da queima da madeira em caldeira para produção de energia (VOUNDINKANA, DEMEYER E VERLO, 1998).

A quantidade magnésio total encontrada nas cinzas foi de 19,96 g/kg, próxima aos valores encontrados na literatura: 34,2 g/kg (SAKTHIVEL; TILLEY; UDERT, 2012), 44,22 g/kg (PEDERSEN, 2003), 16,2 g/kg (HUANG et al., 1992) e 22,5 g/kg (ETIEGNI et al., 1991). Apesar das características das cinzas variarem de acordo com a procedência, pode-se considerar a cinza um resíduo de fácil disponibilidade e baixo custo, com potencial para recuperação de fósforo da urina humana devido a capacidade de alcalinização e elevado teor de magnésio.

A precipitação da estruvita, com fontes renováveis e de baixo custo de fosfato e magnésio, é uma alternativa viável na diminuição dos custos do processo de precipitação (HUANG et al., 2010).

A massa utilizada para análise da cinza foi de 264,6 g, da moringa (almofariz) 22,04g e da moringa (tritador) de 25,81g. Após o peneiramento obteve-se massa para cinza de 264,56g, moringa (almofariz) 22,03g e moringa (tritador) 25,67 g, totalizando perda de 0,04g, 0,01g e 0,14g, respectivamente. Os valores percentuais das frações passantes nas peneiras para moringa oleífera e cinza vegetal estão dispostas na Tabela 4.

Tabela 4 – Porcentagem granulométrica das frações de cinzas e da Moringa oleífera (almofariz e triturador)

Mesh Tyler – Abertura	Cinza	Moringa (Almofariz)	Moringa (Triturador)
14 – 1,18mm	0.30	0.45	5.77
28 – 0,590mm	4.38	42.24	28.17
48 – 0,297mm	31.19	25.05	26.89
100 – 0,149mm	30.49	28.81	37.04
Fundo	33.62	3.40	1.59

Fonte: Autora.

A maior parte das cinzas, cerca de 96%, apresentou frações inferiores a 0,3mm. A Moringa oleífera, moída tanto na almofariz quanto no triturador, apresentou dimensões das partículas entre 0,590mm e 0,297mm, não havendo diferença entre os processos de preparo simulados. Valverde et al. (2014) obtiveram valores similares.

5.3 Ensaios preliminares: definição do tempo de estabilização e do potencial alcalinizante das fontes de magnésio

Analizou-se o tempo de estabilização do pH, para cada fonte de magnésio. Na definição do tempo mínimo de mistura rápida aplicado no teste de jarros e posteriormente

no reator. A Tabela 5, estão dispostos os resultados obtidos do tempo de estabilização do pH das diversas fontes de magnésio empregadas na definição do tempo mínimo de estabilização.

Tabela 5 – Tempo de estabilização do pH das fontes de magnésio

		pH							
Fontes de Magnésio		Cinza		Cal Hidratada		Óxido de Magnésio		Moringa	
Dose (mg / 100 ml)		0,5	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0
Tempo (minutos)	-	6,0	6,0	6,0	6,0	6,1	6,1	6,1	6,1
	0,5	6,3	6,8	8,8	12,3	9,0	9,4	6,1	6,1
	1	6,3	6,8	8,9	12,4	9,5	9,8	6,1	6,1
	3	6,5	7,0	9,0	12,5	10,1	10,3	6,1	6,1
	5	6,5	7,1	9,0	12,6	10,2	10,4	6,1	6,1
	10	6,6	7,1	9,0	12,6	10,4	10,6	6,1	6,1
	15	7,0	7,5	9,0	12,6	10,4	10,6	6,1	6,1
	20	7,1	7,5	9,0	12,6	10,4	10,6	6,1	6,1
	30	7,2	7,7	9,0	12,6	10,4	10,5	6,1	6,1
	60	7,2	8,0	9,0	12,6	10,5	10,5	6,1	6,1
	120	7,2	8,1	9,1	12,6	10,6	10,5	6,1	6,1
	180	7,3	8,1	9,1	12,6	10,6	10,5	6,1	6,1

Fonte: Autora.

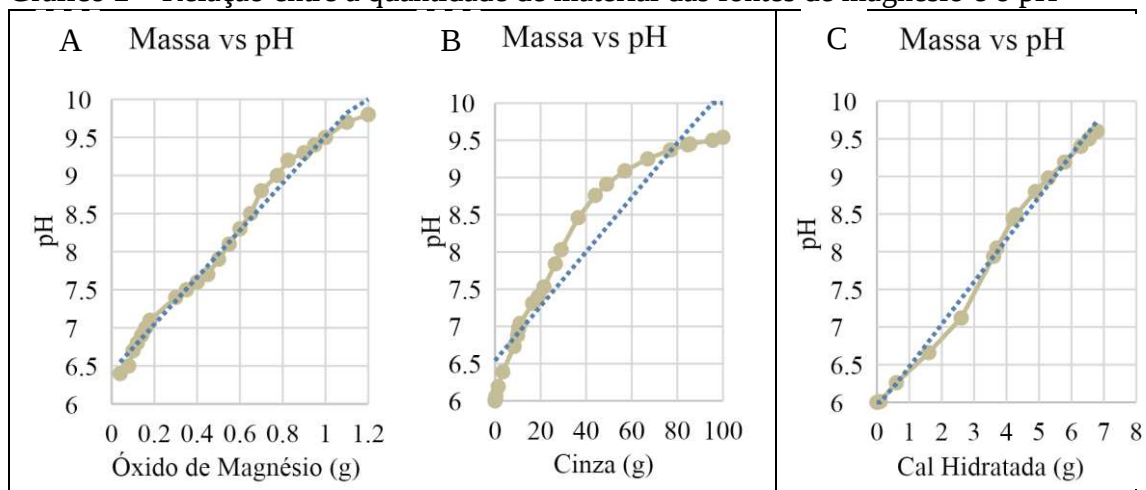
Para a Moringa oleifera não houve modificação nenhuma com relação ao pH inicial, independentemente da quantidade de material utilizado no ensaio. Tanto para a cal hidratada quanto o óxido de magnésio, a variação do pH, após decorrido os três minutos, para ambas as doses, foi considerado estabilizado.

A estabilização do pH, para as cinzas, não foi alcançada dentro do período analisado de 3 horas analisado, se considerado ao menos três valores consecutivos iguais de pH. Porém, como o objetivo final foi a replicabilidade do método no reator de precipitação de estruvita, que opera de forma manual, e também com o objetivo de compará-lo às demais fontes de magnésio, considerou-se o tempo de três minutos de estabilização iguais aos definidos para cal hidratada e óxido de magnésio.

O tempo de estabilização, fixado em 3 minutos, foi adicionado os materiais fontes de magnésio à urina humana, como descrito nos métodos, afim de analisar a quantidade de material necessária para atingir valores de pH até 9,5. No Gráfico 2 estão as relações entre a quantidade de material das fontes de magnésio e o pH.

Observa-se que, enquanto o óxido de magnésio necessitou de pouco menos que 1,2 gramas e a cal hidratada em torno de 6,0 gramas para atingir o pH de 9,5, as cinzas utilizaram cerca de 100,0 gramas.

Gráfico 2 – Relação entre a quantidade de material das fontes de magnésio e o pH



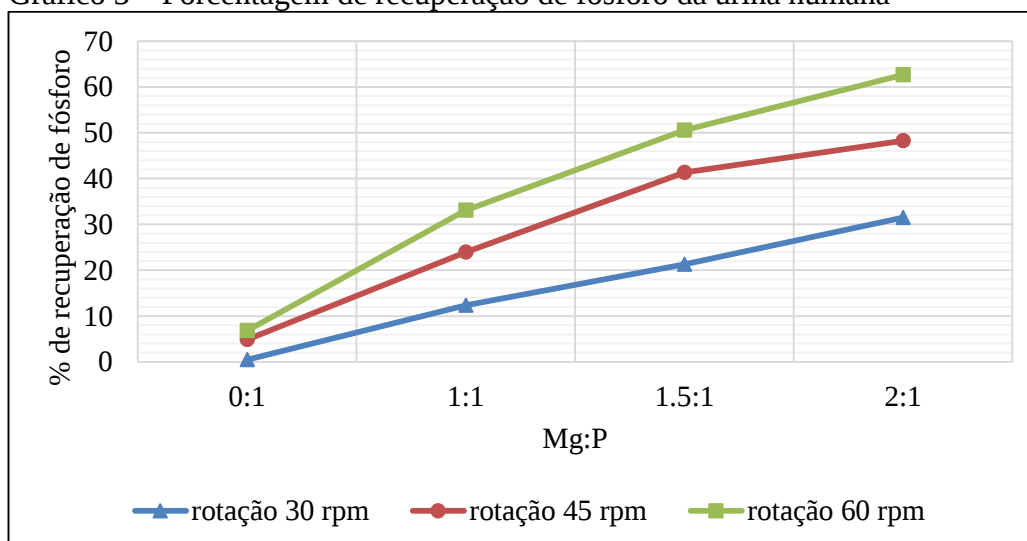
A – Óxido de Magnésio. B – Cinza. C – Cal Hidratada. Fonte: Autora.

5.4 Condições ótimas de precipitação de estruvita

5.4.1 Definição da velocidade de rotação e razão molar

A velocidade de rotação e da razão molar foram obtidas no teste de jarros utilizando óxido de magnésio. Os resultados podem ser observados no Gráfico 3.

Gráfico 3 – Porcentagem de recuperação de fósforo da urina humana



Fonte: Autora.

Observou-se que, quanto maior a velocidade de rotação e razão molar, melhor foi o resultado para a recuperação de fósforo. Para definir a relação de melhor razão molar por velocidade de rotação, analisou-se estatisticamente para os dados de recuperação de fósforo, valores iniciais e finais de pH, condutividade elétrica e temperatura.

Os resultados obtidos durante a pesquisa, utilizados na análise estatística para definição da velocidade de rotação e razão molar para precipitação de estruvita, estão disponíveis no Apêndice A. Utilizando o software SISVAR, submeteram-se os parâmetros à análise de variância e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a nível de 5% de probabilidade.

Conforme apresentado na Tabela 6, os parâmetros pH e condutividade inicial não são significativos a 5% de probabilidade, de acordo com a análise de variância. Aplicando-se o teste de Tukey (Tabela 7), obtém-se:

1. Temperatura inicial e final: não diferem a 5% de probabilidade, independente da razão molar e velocidade de rotação.
2. Condutividade final e pH final: possuem diferenças a 5% de probabilidade entre as razões molares e velocidades de rotação.
3. Recuperação de fósforo: Houve diferença a 5% de probabilidade em relação as razões molares, exceto para a razão de 0:1. Também houve diferença a 5% de probabilidade entre as velocidades de rotações.

Definiu-se, devido ao fato de apresentar maior porcentagem em recuperar fósforo da urina humana, a velocidade de rotação de 60 rpm e razão molar de 2:1 (MgO:P), resultados diferentes foram obtidos por Barbosa et al. (2016), recuperando 90% de fósforo com razão molar de 2:1 (Mg:P) porém com a rotação de 30 rpm.

Pesquisas realizadas com o objetivo de recuperar fósforo da urina humana obtiveram entre 90-100% de recuperação de fósforo da urina humana, porém todas procederam as etapas de análise após período de estocagem que acarretou a elevação do pH, para valores de pH superiores a 8 (LATIFIAN; HOLST; LIU, 2013; MORALES et al., 2013; HUG; UDERT, 2013; Liu et al., 2008; RONTELTAP; MAURER; GUJER, 2007; WILSENACH; SCHUURBIERS; VAN LOOSDRECHT, 2007; GANROT et al., 2007). Sendo a proposta desta pesquisa a não estocagem de urina humana, considerou-se o resultado otimista se comparado aos demais.

O óxido de magnésio atua tanto na alcalinização da urina, quanto suprimindo o magnésio necessário para a precipitação de estruvita. Logo, apesar dos melhores resultados obtidos terem sido na concentração 2:1 (MgO:P), o pH (7,7 valor máximo de pH atingido nesta) foi o fator interveniente. Dada as diferenças e singularidades encontradas nos trabalhos mostrados e análise estatística, pode-se dizer que, após suprida a deficiência de magnésio, o pH é o principal fator no processo de precipitação de estruvita.

Tabela 6 – Resumo da análise de variância da porcentagem de recuperação de fósforo (PRF), do pH inicial (pHI) e final (pHF), temperatura inicial (TI) e final (TF), condutividade inicial (CI) e final (CF) e os respectivos coeficientes de variância

F.V.	G.L.	Quadrados Médios						
		% Recuperação de Fósforo	pH inicial	pH final	Temperatura inicial	Temperatura final	Condutividade inicial	Condutividade final
ROT	2	848.874811**	0.001225NS	2.163369 **	0.095278**	0.091944**	0.002411NS	0.320258**
PROP	3	3122.024330 **	0.000373NS	0.746289 **	0.446204**	1.486667**	0.000284NS	0.019121*
ROT x PROP	6	76.251630 **	0.000240 NS	0.052825 **	0.300093**	0.325278**	0.003715NS	0.073066**
Resíduo	36	13948.868522	0,063014	0,037822	26.469722	73.322222	10.986497	14.428275
CV(%)		23,80	0.32	1.15	1.58	1.89	0.40	0.92

Fonte: Autora. *F – significativo a 5% de probabilidade; **F – significativo a 1% de probabilidade; e NS – F não significativo a 5% de probabilidade. F.V – Fator de variação. G.L. – Grau de liberdade. CV – Coeficiente de variância. ROT – Rotação. PROP – Dose de magnésio.

Tabela 7 – Valores médios da PRF, PHF, TI, TF e CI do sobrenadante para as respectivas relações de velocidade de rotação no JarTest e dose.

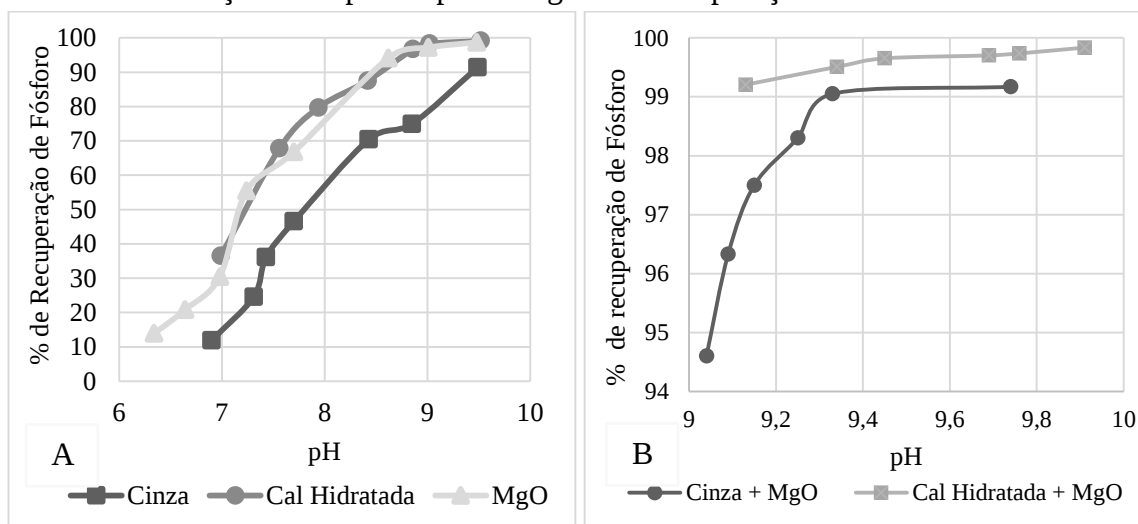
Proporção MgO:P	% Recuperação de Fósforo			pH final do sobrenadante			Temperatura inicial (°C)			Temperatura final (°C)			Condutividade final (mS/cm)		
	Rotação (rpm)														
	30	45	60	30	45	60	30	45	60	30	45	60	30	45	60
(0:1)	0.97	4.33	6.80	5,73	6,37	6,71	22,40	21,46	21,57	23,03	22,53	22,53	17,30	17,67	17,89
	aA	aA	aA	aA	aB	aC	aA	aA	aA	aA	aA	aA	aA	aB	aB
(1:1)	17.47	21.04	30.89	6,03	6,67	6,80	22,23	22,10	22,17	23,37	23,53	23,76	17,37	17,70	17,61
	bA	bA	bB	bA	bB	aC	aA	aA	aA	aA	aA	aA	aA	aAB	abB
(1,5:1)	27.06	35.58	45.35	6,13	6,70	7,08	21,90	21,90	22,10	23,47	23,33	23,80	17,30	17,62	17,63
	cA	cB	cC	bA	bB	bC	aA	aA	aA	aA	aA	aA	aA	aB	abB
(2:1)	33.14	46.60	62.67	6,66	6,98	7,30	21,46	21,90	21,57	22,67	23,50	23,13	17,59	17,75	17,45
	cA	dB	dC	cA	cB	cC	aA	aA	aA	aA	aA	aA	aA	aAB	bB

Fonte: Autora. As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha para cada variável não difere entre se ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de TUKEY.

5.4.2 Definição do parâmetro pH utilizando fontes alternativas de magnésio

A relação entre os valores de pH e a porcentagem de recuperação de fósforo da urina humana podem ser observados no Gráfico 4. A cal hidratada e o óxido de magnésio apresentaram valores mais próximos para recuperação de fósforo se comparado a cinza (Gráfico 4). A cal hidratada obteve recuperação de fósforo superior a 90% em pH 9,0, o óxido de magnésio em pH 8,5 e a cinza em pH superior a 9,5. Após a adição de 1 grama de MgO na cinza e na cal hidratada os valores de pH elevaram-se a valores superiores a 9, com mais de 94% de recuperação de fósforo.

Gráfico 4 – Relação entre pH e a porcentagem de recuperação de fósforo da UH



A – Utilizando três fontes de magnésio. B – Cinza e Cal Hidratada acrescida de MgO.

Fonte: Autora.

Em experimento realizado por Sakthivel, Tilley e Udert (2012), foram adicionados 11,4 g da cinza de madeira para ensaio de precipitação, com duração de 4 horas e intervalos de 30 min de amostragem, onde o pH inicial foi de 8,5 e elevando até valores de 9,21. Na primeira meia hora de teste obtiveram 87% de recuperação de fósforo da urina e após às 4 horas chegou a valores de 99%.

No presente trabalho, com adição de 12 gramas de cinzas, obtivemos cerca 11% de recuperação de fósforo, todavia o valor do pH permaneceu em 7. Nota-se que em valores elevados de pH a urina tende a formas precipitados de forma natural (SAKTHIVEL; TILLEY; UDERT, 2012).

Com os dados da caracterização dos precipitadores, foi calculado a quantidade de magnésio presente nos materiais utilizados (Tabela 8). Para atingir mesmos valores de

pH, os materiais utilizados apresentaram valores diferentes de massa e de magnésio. Se comparar valores de recuperação de fósforo relativamente próximos, por exemplo: cal hidratada (pH 8,5) com 87% de recuperação, óxido de magnésio (pH 8,5) com 94% de recuperação e cinza (pH 9,5) com 91% de recuperação, tem-se quantidades de magnésio diferentes: 0,12g para cal hidratada, 1,96g para o óxido de magnésio e 3,47 g para as cinzas.

Tabela 8 – Quantidade de magnésio presente nas fontes alternativas de magnésio de acordo com o pH

pH	Cal Hidratada	Cinza	Óxido de Magnésio
	Magnésio em gramas – Quantidade total em gramas de material utilizado		
7,0	0,07 – 2,60	0,42 – 12,00	1,00 – 1,00
7,5	0,09 – 3,20	1,12 – 32,00	1,25 – 1,25
8,0	0,11 – 3,80	1,40 – 40,00	1,50 – 1,50
8,5	0,12 – 4,40	1,75 – 50,00	2,00 – 2,00
9,0	0,18 – 6,60	2,44 – 70,00	2,25 – 2,25
9,5	0,19 – 6,90	3,47 – 99,49	2,50 – 2,50

Fonte: Autora.

A análise da correlação linear entre as variáveis: massa, recuperação de fósforo e pH para cada material, pelos testes paramétricos de coeficientes de correlação de Pearson e o não-paramétrico de correlação de Spearman, mostrou que:

- tanto a cinza, quanto a cal hidratada e o óxido de magnésio obtiveram valores de significância a nível $p < 0,001$, comparando-os para as variáveis de massa, recuperação de fósforo e pH.
- o resultado da correlação de Pearson foi mais robusto que o Spearman, todavia, em ambos, a correlação foi superior a 0,90 para pH, para demais variáveis ambos apresentaram valores significativos superiores a 0,80.

A fim de avaliar a relação entre a massa utilizada e a recuperação de fósforo para cada material, seguiram-se os passos de análises estatística, na qual verificou-se, pelo teste de Shapiro-Wilk, que a cinza tem distribuição normal, enquanto os demais materiais possuem distribuição não normal.

De acordo com o teste de Levene, a cal hidratada e o óxido de magnésio são homogêneos, todavia, como são não-paramétricos aplicou-se Kruskal-Wallis seguido de posteriori Nemenyi. O teste demonstrou que para as cinzas a recuperação de fósforo difere para todos os níveis de massa, para cal hidratada ela difere entre os níveis de 2,6

e 6,9 de recuperação de fósforo e massa, e para óxido de magnésio ela difere entre os níveis de 2,5 e 1 de recuperação de fósforo e massa.

5.4.3 Definição da melhor forma de extração e dose de *Moringa oleifera* para recuperação de fósforo da urina humana

Os resultados das diferentes formas de extração e concentração de moringa, para recuperação de fósforo da urina humana estão dispostas na Tabela 9.

Tabela 9 – Porcentagem de recuperação de fósforo da UH com *Moringa Oleifera*

Porcentagem de recuperação de fósforo (%)					
Dose (mg/L)	T1		T2		
100000	3,00		2,52		
30000	1,40		3,29		
5000	2,00		3,88		
3000	6,00		12,21		
Porcentagem de recuperação de fósforo (%)					
Dose (mg/L)	T3	T4	T5	T6	T7
100	*3,00	*12,14	*10,45	37,00	20,00
250	*3,32	*7,94	*5,43	48,00	17,00
500	14,06	8,64	9,80	22,00	40,00
750	6,64	9,46	5,40	10,00	29,00
1000	2,66	6,15	3,20	*3,53	20,00
2000	*3,85	9,47	* 3,27	1,24	28,00

T – Teste. * – Porcentagem de aumento da quantidade de fósforo no sobrenadante. Fonte: Autora.

Para a grande maioria dos testes, a porcentagem de recuperação de fósforo foi extremamente baixa, chegando alguns casos a incrementar fósforo no sobrenadante (Tabela 9). Apesar dos resultados promissores, como por exemplo, na dose de 250 mg/L – 48% de recuperação de fósforo, e na dose de 500mg/L – 40% de recuperação de fósforo, relata-se que não houve ocorrência de sedimentação, de quaisquer precipitados na urina humana, em nenhum dos tratamentos.

Etter et al. (2011), utilizando sementes de *Moringa oleifera* preparadas em duas concentrações de sementes secas e trituradas em liquidificador, nas concentrações de 50 mg/L e 500 mg/L, também não obteve sucesso na recuperação de fósforo e a moringa aumentou a quantidade de sólidos presentes na urina.

5.5 Análise do sobrenadante do teste de jarros

A análise do sobrenadante da fase inicial de teste de jarros da etapa de avaliação dos valores ótimos para velocidade de rotação das pás (rpm) e razão molar de MgO:P , com adição de óxido de magnésio no teste de jarros, estão dispostos na Tabela 10. Destaca-se que os resultados foram obtidos para o sobrenadante não diluído, diferente do que ocorreria caso a coleta fosse em vaso sanitário padrão.

Porém, registrou-se a obtenção de cerca 1,8g/L de estruvita por litro de urina, após decantado, o valor de óxido de magnésio adicionado.

Após adição de magnésio, verificou-se que parte da quantia adicionada permaneceu em solução. Os macro e micronutrientes, presentes no sobrenadante, continuaram expressivos, implicando numa possível necessidade de recirculação do efluente, na tentativa de recuperar estes itens, ou no aprimoramento do processo utilizado.

Como esperado, houve uma diminuição da quantidade de fósforo, aumento do pH e turbidez ao longo dos tratamentos. Pode-se assim, inferir que houve formação de sólidos fosfatados (CANTAROW; SCHEPARTZ, 1967).

A disposição no solo da urina humana já é uma realidade, desde que a urina seja estocada em containers / reservatórios fechados por período mínimo de seis meses. Todavia, se considerarmos uma família de 4 pessoas, gerando cerca de 1,5 litros de urina por dia, por seis meses teremos em média cerca de 1.080 litros de urina produzida, após esse período de acúmulo é necessário ainda estocagem por mais seis meses para liberada de uso. Nesse período, pode vir a ocorrer geração de maus odores e perda de nitrogênio por volatilização.

Porém, os riscos associados à aplicação das águas residuárias no solo são decorrentes da possível presença de bactérias patogênicas e vírus, além de substâncias químicas perigosos para a saúde (MATOS; MATOS, 2017). No caso da urina, podem ocorrer por contaminação cruzada. Além disso, há também o risco de toxicidade advindo de fármacos e disruptores endócrinos.

Tabela 10 – Caracterização do sobrenadante da primeira etapa do teste de jarros

Parâmetros	Unid.	Urina Bruta	Velocidade de rotação das pás no teste de jarros											
			30 rpm				45 rpm				60 rpm			
		Dose (Mg:P)	0:1	1:1	1,5:1	2:1	0:1	1:1	1,5:1	2:1	0:1	1:1	1,5:1	2:1
Cálcio	mg/L	45,20	50,30	48,10	45,00	40,20	47,80	40,30	34,50	34,50	32,20	33,60	32,90	33,70
Cloreto	mg/L	22.556	25.141	33.452	28.636	26.831	33.573	26.734	30.341	345.58	58.792	51.994	40.224	45.157
Cobre	mg/L	0,34	0,29	0,16	0,82	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ferro	mg/L	1,17	1,29	1,87	1,94	1,91	0,79	0,53	0,51	0,68	0,21	0,52	1,05	0,15
Magnésio	mg/L	83,00	58,00	98,00	120,00	131,00	59,00	197,00	214,00	243,00	70,00	191,00	209,00	183,00
Manganês	mg/L	0,03	0,02	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Potássio	mg/L	419,00	433,00	486,00	458,00	533,00	599,00	535,00	534,00	479,00	347,00	481,00	492,00	399,00
Sódio	mg/L	1.608	1.750	1.964	1.880	1.524	1.356	2.000	1.970	1.764	1.259	2.089	1.771	1.710
Condutividade	mS/cm	18,19	17,67	17,73	17,62	17,88	17,89	17,72	17,64	18,16	17,84	18,00	18,00	18,01
Cor	uH	2.402	2.203	2.520	2.473	2.695	2.425	3.069	3.147	3.415	2.360	2.911	3126	3.199
DBO	mg/L	13.355	11.851	11.222	17.034	10.711	12.942	13.549	12.839	11.292	9.149	15.170	17.136	13.046
DQO	mg/L	14.361	14.164	13.575	13.811	11.770	13.575	13.968	15.224	13.497	12.476	14.046	16.166	12.790
Fósforo	mg/L	538,00	527,21	448,72	411,39	375,28	522,50	403,37	269,41	216,03	494,24	318,07	190,39	174,52
pH	-	5,68	5,68	6,57	6,92	6,77	5,68	6,68	6,99	7,40	5,68	6,85	7,23	7,58
Turbidez	NTU	33,70	23,50	36,30	32,00	44,80	41,70	58,10	81,80	75,80	35,00	56,30	61,50	70,60

ND – Não detectado. Fonte: Autora.

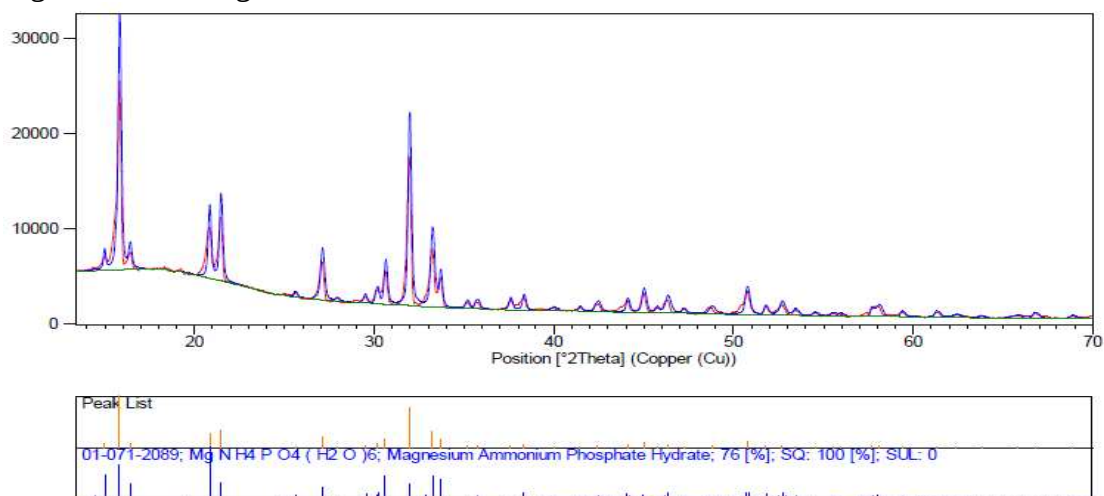
5.6 Caracterização e avaliação dos precipitados

5.6.1 Caracterização do sólido da etapa de definição da velocidade de rotação e razão molar

O material sólido, proveniente do melhor resultado de recuperação de fósforo (61% de recuperação) com uso de óxido de magnésio apresentou os valores de $N_{\text{total}} = 0,81\%$, $P_2O_{5\text{total}} = 14,66\%$, $K_2O_{\text{total}} = 1,76\%$ e $K_{\text{total}} = 1,46\%$.

A análise de difração de raio X (DRX), deste material, foi realizada com o auxílio do software de identificação de fases: X'Pert High Score Plus, que compara fases presentes na amostra sólida, possibilitando um análise semi-quantitativa (Figura 9). A análise de difração de raio X (DRX) comprovou a formação majoritária de estruvita, com cerca de 100% de grau de pureza, pela análise semi-quantitativa.

Figura 9 – Difratoograma de raios-X da amostra de estruvita



Fonte: Autora.

5.6.2 Caracterização do sólido da etapa de análise do pH

Foram caracterizados os materiais que obtiveram o maior teor de recuperação de fósforo, os resultados estão dispostos na Tabela 11. As cinzas utilizadas foram a com 95% de recuperação, a cal hidratada utilizada foi com 98% de recuperação, e do óxido de magnésio com 97% de recuperação.

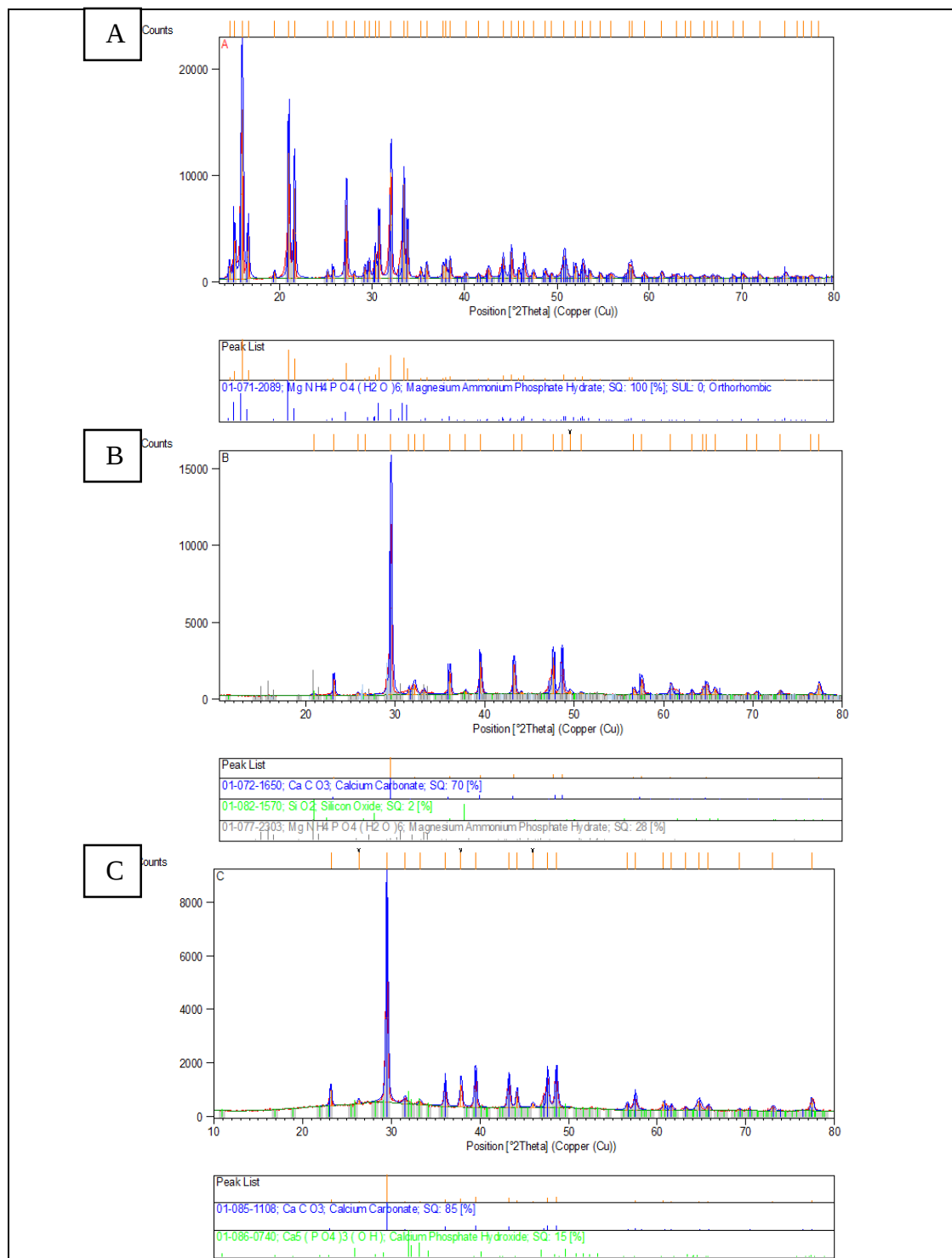
Tabela 11 – Caracterização dos materiais precipitados com diferentes fontes de magnésio

Material	Tipo de diluição	Macro e micronutrientes (dag/Kg)													
		P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Zn	Mn	B	Ni	Mo	Na	N
Cinza	Meio Ácido	2,84	1,08	25,66	3,49	0,12	0,01	0,16	0,02	0,56	0,02	0,00	ND	0,72	0,41
	Água Destilada	0,11	0,21	0,06	0,21	0,14	0,00	ND	0,00	0,00	ND	ND	ND	0,21	0,32
Cal Hidratada	Meio Ácido	3,23	0,79	23,64	2,78	0,40	ND	0,06	0,00	0,01	0,00	ND	ND	1,04	1,10
	Água Destilada	0,04	0,30	0,35	0,61	0,31	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0,65	0,03
Óxido de Magnésio	Meio Ácido	12,10	0,38	0,89	11,47	0,16	ND	ND	0,00	ND	ND	ND	ND	0,06	0,25
	Água Destilada	0,19	0,03	0,03	0,11	0,34	ND	ND	0,00	ND	ND	ND	ND	0,08	0,23

ND – Não detectado. Fonte: Autora.

Estes materiais também foram submetidos à análise de difração de raio X (DRX), com o auxílio do Software de identificação de fases: X'Pert High Score Plus, (Figura 10).

Figura 10 – Difratoograma de raios-X do precipitado com óxido de magnésio P.A.



A – óxido de magnésio. B – Cinza. C – Cal hidratada. Fonte: Autora.

De acordo com a análise semi-quantitativa, formaram-se os seguintes cristais usando óxido de magnésio: $\text{MgNH}_4\text{PO}_4(\text{H}_2\text{O})$ – 100% (Estruvita); cinza: CaCO_3 – 70%, SiO_2 – 2% e $\text{MgNH}_4\text{PO}_4(\text{H}_2\text{O})$ – 28% (Estruvita); e cal hidratada: CaCO_3 – 73%; $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$ – 15% (Hidroxiapatita).

Outros minerais que se formaram durante o processo de precipitação química, podem ser devido as características da material fonte de magnésio ou das quantidades de outros cátions metálicos divalentes ou trivalentes que podem ser encontrados na urina (KARAK; BHATTACHARYYA, 2011).

Os resultados da comparação entre os nutrientes obtidos nessa pesquisa comparando-os com fertilizantes comerciais estão dispostos na Tabela 12.

Tabela 12 – Comparação entre os teores de nutrientes obtidos dos materiais fontes de magnésio e os fertilizantes comerciais

Nutriente s em %	Óxido de Magnésio	Cinza	Cal Hidratada	MAP*	DAP*	Superfosfato simples*
N	0,25	0,41	1,10	10	16	-
P	12,10	2,84	3,20	46 a 50**	38 a 40**	16 a 18**
K	0,38	1,08	0,80	-	-	-
Ca	0,89	25,66	23,60	-	-	18 a 20
Mg	11,47	3,49	2,80	-	-	-

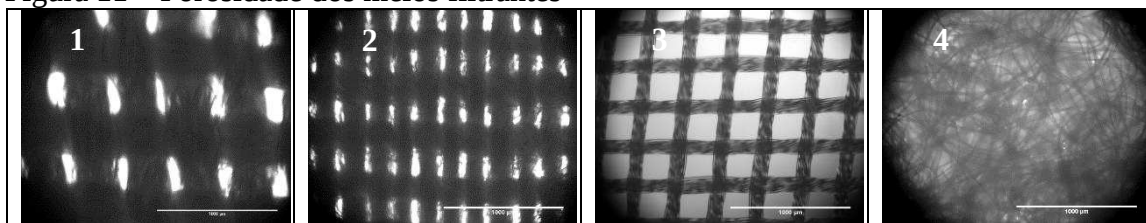
MAP – Fosfato Monoamônico. DAP – Fosfato Diamônico. *Valor de referência da Embrapa, 2019. ** P_2O_5 . Fonte. Autora.

Apesar dos valores dos fertilizantes comerciais demonstrarem resultados superiores aos da pesquisa, não se pode descartar os materiais como possíveis fontes de nutrientes. A estruvita, com cerca de 12% de fósforo em sua composição, a cinza e o cal hidratada com 25% e 23% de cálcio, respectivamente.

5.7 Protótipo de reator de recuperação de nutrientes em forma de estruvita

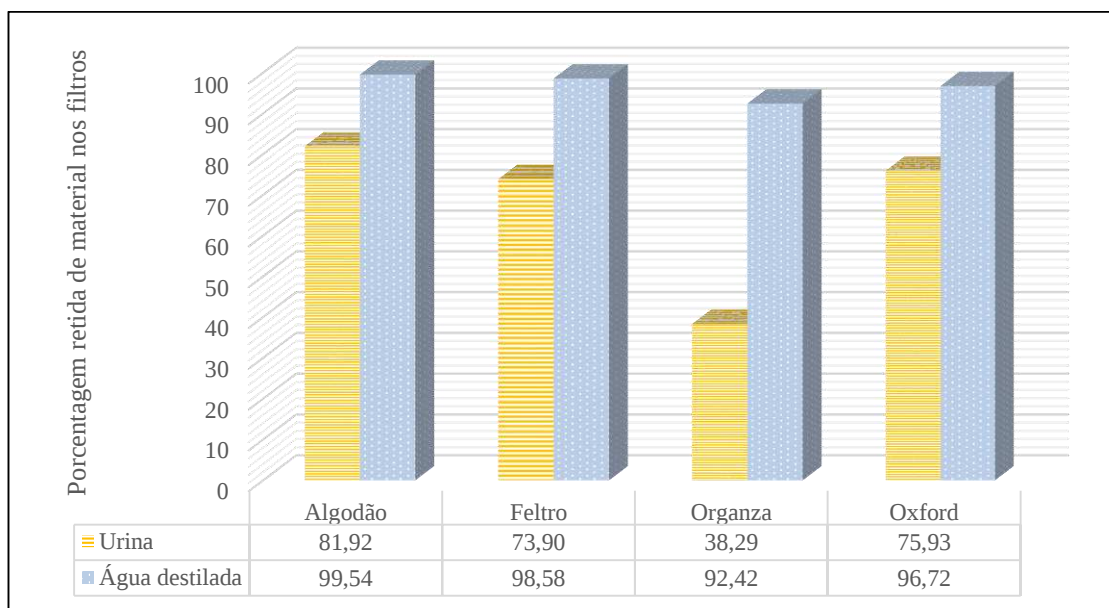
A área dos poros dos materiais filtrantes (Figura 11) e o percentual de sólidos retidos no material filtrante (Gráfico 5) indicam que o algodão (área do poro $\pm 0,015\text{mm}^2$) está mais propício a reter partículas durante o processo de filtração, do que o de oxford (área do poro $\pm 0,035\text{mm}^2$) e organza (área do poro $\pm 0,05\text{mm}^2$). O formato das tramas do material filtrante confeccionado de feltro impediu a mensuração da área dos poros.

Figura 11 – Porosidade dos meios filtrantes



Fonte: Autora. 1. Oxford ($A_{\text{poro}} < 0,035 \text{ mm}^2$), 2. Algodão ($A_{\text{poro}} < 0,015 \text{ mm}^2$), 3. Organza ($A_{\text{poro}} < 0,05 \text{ mm}^2$), e 4. Feltro (A_{poro} – indefinido).

Gráfico 5 – Percentual de sólidos retidos nos materiais filtrantes



Fonte: Autora.

Analisando, simultaneamente, o tamanho dos poros e o teste de permeabilidade, pode-se indicar o filtro confeccionado de algodão para uso no protótipo de recuperação de estruvita.

5.7.1 Replicabilidade do teste de jarros no protótipo de reator de estruvita

De acordo com os resultados obtidos, nos itens anteriores, aplicou-se no protótipo de reator de precipitação de estruvita a razão molar 2:1 (MgO:P) e velocidade de rotação 60 rpm. A quantidade recuperada de fósforo foi de 63,5%, com pH inicial de 5,8, condutividade elétrica de 17,2 mS/cm e temperatura de 25,6 °C, valores finais de pH a 7,7, condutividade de 16,5 mS/cm e temperatura de 27,5 °C.

Considerou-se o valor obtido igual ao resultado das análises feitas no Jar-Test utilizando óxido de magnésio, no qual houve cerca de 61% de recuperação de fósforo da urina humana, conferindo ao protótipo a capacidade de replicar os dados do teste de jarros e recuperar nutrientes da urina humana em forma de estruvita.

6 CONCLUSÕES

Levando em consideração todos os aspectos apresentados nessa pesquisa, conclui-se que:

- As melhores condições de precipitação de estruvita em urina fresca utilizando óxido de magnésio sem alteração inicial de pH, foram com razão de Mg:P a 2:1, velocidade de rotação de 60 rpm e pH de 6,0 com 61% de recuperação de fósforo;
- Cerca de 99% do fósforo foi recuperado utilizando cinzas, cal hidratada e óxido de magnésio quando modificado pH inicial da urina para valores de pH 9,5.
- A Moringa oleifera demonstrou ser inviável para precipitação de estruvita da urina humana;
- O sobrenadante e/ou filtrado do processo de obtenção de estruvita necessita de tratamento ou processo de armazenamento para uso em fertirrigação;
- Os percentuais de formação de estruvita alcançaram 100% utilizando óxido de magnésio e 28% utilizando cinza. Não houve formação de cristais de estruvita para cal hidratada;
- O fertilizante, proveniente da estruvita usando óxido de magnésio, possui potencial se comparado aos fertilizantes comerciais. Os produtos, oriundos da utilização da cal hidratada e as cinzas, também são potenciais como fertilizantes, todavia deve-se atentar aos fatores limitantes e aos índices de metais pesados suportados pelo solo e pela cultura em que for empregado; e
- O reator de precipitação de estruvita recuperou 63% de fósforo da urina humana, em pH 5,8, replicando o resultado obtido no teste de jarros.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para estudos futuros, recomenda-se:

- Definição de valores fixos ou faixas de dose de magnésio a serem aplicados, independente da procedência da urina humana, e de formas de identificação da dose ideal de forma rápida e a baixo custo;
- Aplicação do protótipo de reator de estruvita em escala real, analisando os aspectos positivos e negativos de cada etapa do processo de produção de estruvita, bem como sua receptividade por parte dos usuários;
- Verificação, em diferentes formas de coleta da urina humana, do risco de contaminação cruzada por resíduos fecais;
- Análise dos fármacos e disruptores endócrinos, tanto no precipitado quanto no filtrado do processo de formação de estruvita;
- Avaliação de possíveis processos concomitantes que recuperem fósforo da urina humana e ao mesmo tempo trate o efluente, para posterior uso e aplicação por fertirrigação, eliminando a necessidade de estocagem;
- Realização de estudos de caracterização da estruvita de acordo com os parâmetros brasileiros de classificação de fertilizantes;
- Detalhamento e análise das etapas de produção de estruvita, aplicada à realidade brasileira, visando os princípios da economia circular.

REFERÊNCIAS

AIDAR, F. N. **Fatores intervenientes na cristalização da estruvita para a recuperação do fósforo de esgoto**. 2012. 137 fl. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

APHA, AWWA, and WEF. 2017. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**, 20th ed., Washington, DC: American Public Health Association.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7175: Cal hidratada para argamassas: Requisito**. Rio de Janeiro, p. 4. 2003.

BARBOSA, S. G. et al. A design of experiments to assess phosphorous removal and crystal properties in struvite precipitation of source separated urine using different Mg sources. **Chemical Engineering Journal**, [s.l.], v. 298, p.146-153, ago. 2016. Elsevier BV.

BELTRÁN-HEREDIA, Jesús; MARTÍN, Jesús Sánchez. Azo dye removal by Moringa oleífera seed extract coagulation. **Coloration Technology**, [s.l.], v. 124, n. 5, p.310-317, out. 2008. Wiley.

BENÁ FILHO, N. B. **Estruvita**: identificação de potenciais perigos e eventos perigosos no processo de produção, percepção e aceitabilidade de agricultores quanto ao seu uso agrícola. 2019. 247 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Mestrado Profissional em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2019.

BENETTO, E.; NGUYEN, D.; LOHMANN, T.; SCHMITT, B.; SCHOSSELER, P. Life cycle assessment of ecological sanitation system for small-scale wastewater treatment. **Science of the Total Environment**, v.407, p.1506-1516, 2009.

BENNETT, G. F. Pollution control in fertilizer production. C.A. Hodge and N. N. Popovici, eds., Marcel Dekker, New York, N.Y, (1994), 528 pages, [ISBN: 0-8247-9188-6], U.S. List Price. **Environmental Progress**, [s.l.], v. 15, n. 1, p.14-14, 1996. Wiley-Blackwell.

BOUROPOULOS, N. Ch., KOUTSOUKOS, P. G. Spontaneous precipitation of struvite from aqueous solutions. **Journal of Crystal Growth**, v. 213, p. 381-388, 2000.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e estatística. Censo demográfico 2010: Características da população e dos domicílios: resultados do universo. Rio de Janeiro: IBGE, 2011.

CAMARGO, C. C. **Tratamento de lixiviado de aterro sanitário**: Remoção de amônia por formação de estruvita. 2012. 97 fl. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2012.

CASTRO, S. R. et al. Precipitação química de estruvita: Recuperação de nutrientes em reator cônico de leito fluidizado utilizando magnésia industrial de baixo custo. **Revista Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 20, n. 2, p. 24, 2012.

CORRE, K. S. Le et al. Phosphorus Recovery from Wastewater by Struvite Crystallization: A Review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, [s.l.], v. 39, n. 6, p.433-477, jun. 2009. Informa UK Limited.

DANIELSON, S. et al. G91-1023 Insects that attack seeds and seedlings of field crops. Historical Materials from University of Nebraska-Lincoln Extension 1099. 1991.

DINIZ, D. T. L. **Remoção de nitrogênio amoniacal de lixiviado de aterro de resíduos sólidos por precipitação química com formação de estruvita**. 2010. 95 fl. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, 2010.

ESCHER, B. I.; PRONK, W.; SUTER, M.; MAURER, M. Monitoring the removal efficiency of pharmaceuticals and hormones in different treatment processes of source-separated urine with bioassays. **Environmental Science and Technology**, v.40, n.16, p. 5095-5101, 2006.

ETIEGNI, L. et al. Evaluation of wood ash disposal on agricultural land. II. Potential toxic effects on plant growth. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, [s.l.], v. 22, n. 3-4, p.257-267, fev. 1991. Informa UK Limited.

ETTER, B. et al. Low-cost struvite production using source-separated urine in Nepal. **Water Research**, [s.l.], v. 45, n. 2, p.852-862, jan. 2011. Elsevier BV.

ETTER, B. **Process optimization of low-cost struvite recovery**. 2009. 55 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Environmental Sciences and Engineering, Swiss Federal Institute of Technology Lausanne, Nepal, 2009.

FAO, 2013. FAO Statistical Yearbook, 2013. World Food and Agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

FOLETTTO, E. L. et al. Adsorption of a leather dye on mesoporous struvite obtained from swine wastewater. **Chemical Engineering Communications**. v. 200, n. 8, p. 1027-1038, 2013c.

FOLETTTO, E. L. et al. Organic Pollutants removal and recovery from animal wastewater by mesoporous struvite precipitation. **Desalination and Water Treatment**, v. 51, n. 13-15, p.2776-2780, 2013a.

FOLETTTO, E. L. et al. Production of struvite as an alternative to reduce the content of nitrogen and phosphorus from swine wastewater. **Latin American Applied Research**, v. 43, p. 77-80, 2013b.

GANESAPILLAI, M. et al. Nutrient Recovery and Recycling from Human Urine: A Circular Perspective on Sanitation and Food Security. **Procedia Engineering**, [s.l.], v. 148, p.346-353, 2016. Elsevier BV.

GANROT, Zsófia et al. Plant availability of nutrients recovered as solids from human urine tested in climate chamber on *Triticum aestivum* L. **Bioresource Technology**, [s.l.], v. 98, n. 16, p.3122-3129, nov. 2007. Elsevier BV.

GATERELL, M. R. et al. An Economic and environmental evaluation of the opportunities for substituting phosphorus recovered from wastewater treatment works in existing UK fertiliser markets. **Environmental Technology**, [s.l.], v. 21, n. 9, p.1067-1084, set. 2000. Informa UK Limited.

GELL, K. et al. Safety and effectiveness of struvite from black water and urine as a phosphorus fertilizer. **Journal of Agricultural Science**, [s.l.], v. 3, n. 3, p.67-80, 5 set. 2011. Canadian Center of Science and Education.

GOPALAKRISHNAN, Lakshmipriya; DORIYA, Kruthi; KUMAR, Devarai Santhosh. *Moringa oleifera*: A review on nutritive importance and its medicinal application. **Food Science and Human Wellness**, [s.l.], v. 5, n. 2, p.49-56, jun. 2016. Elsevier BV.

HANÆUS, Jörgen; HELLSTRÖM, Daniel; JOHANSSON, Erica. A study of a urine separation system in an ecological village in Northern Sweden. **Water Science and Technology**, [s.l.], v. 35, n. 9, p.153-160, 1997. IWA Publishing.

HÖGLUND, C. et al. Viral persistence in source-separated human urine. **Advances in Environmental Research**, [s.l.], v. 6, n. 3, p.265-275, set. 2002. Elsevier BV.

HUANG, H. M. et al. Wood ash as a soil additive and liming agent for wheat: field studies. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, [s.l.], v. 23, n. 1-2, p.25-33, jan. 1992. Informa UK Limited.

HUANG, H. M. et al. Removal of ammonium as struvite using magnesite as a source of magnesium ions. **Water Practice and Technology**, v. 5, n.1, p. 1-9, 2010.

HUG, A.; UDERT, K. M. Struvite precipitation from urine with electrochemical magnesium dosage. **Water Research**, [s.l.], v. 47, n. 1, p.289-299, jan. 2013. Elsevier BV.

JOHANSSON, M. **Urine Separation**: closing the nutrient cycle. Stockholm: R&d Project, 2001.

JÖNSSON, H. Urine separation - Swedish experiences. **EcoEng Newsletter** 1, October 2001.

JÖNSSON, H. et al. Composition of urine, faeces, greywater and biowaste for utilisation in the URWARE model. **Urban Water Journal**, 2005. 49p.

KATAKI, S. et al. Phosphorus recovery as struvite: recent concerns for use of seed, alternative Mg source, nitrogen conservation and fertilizer potential. **Resources, Conservation and Recycling**, [s.l.], v. 107, p.142-156, fev. 2016. Elsevier BV.

KATAKI, S. et al. Phosphorus recovery as struvite from farm, municipal and industrial waste: feedstock suitability, methods and pre-treatments. **Waste Management**, [s.l.], v. 49, p.437-454, mar. 2016. Elsevier BV.

KVARNSTRÖM et al. Separação de urina: um passo em direção ao saneamento sustentável. **Programa EcoSanRes**. Instituto Ambiental de Estocolmo. 2006.

Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/237502256_Separacao_de_urina_Um_passo_em_direcao_ao_saneamento_sustentavel. Acessado em: 09 de novembro de 2017.

LARSEN, T. A. et al. How to avoid pharmaceuticals in the aquatic environment. **Journal of Biotechnology**, [s.l.], v. 113, n. 1-3, p.295-304, set. 2004. Elsevier BV.

LATIFIAN, M.; HOLST, O.; LIU, J. Nitrogen and Phosphorus Removal from urine by sequential struvite formation and recycling process. **Clean Soil, Air, Water**, [s.l.], v. 42, n. 8, p.1157-1161, 18 nov. 2013. Wiley-Blackwell.

LE CORRE, K. S.; VALSAMI-JONES, E.; HOBBS, P.; PARSONS, S. A. Phosphorus Recovery from Wastewater by Struvite Crystallization: A review. *Crit. Rev. Environmental Science & Technology*, v.39, p.433-477, 2009.

LIRA, L. F. G. **Recuperação de fósforo por cristalização de estruvita**. 2012. 44 fl. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) – Centro tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2012.

LIU, B. et al. Characterization of induced struvite formation from source-separated urine using seawater and brine as magnesium sources. **Chemosphere**, [s.l.], v. 93, n. 11, p.2738-2747, nov. 2013. Elsevier BV.

LIU, Z. et al. Urea hydrolysis and recovery of nitrogen and phosphorous as MAP from stale human urine. **Journal of Environmental Sciences**, [s.l.], v. 20, n. 8, p.1018-1024, jan. 2008. Elsevier BV.

LOPES, H. J. J. **O Laboratório Clínico na Avaliação da Função Renal**. Belo Horizonte: Analisa, 2004. 27 p.

LUCAS, S. D.; JONES, D. L. Urine enhances the leaching and persistence of estrogens in soils. **Soil Biology & Biochemistry**, v.41, p.236-242, 2009.

MÄKITALO, M. et al. Characterization of green liquor dregs, potentially useful for prevention of the formation of acid rock drainage. **Minerals**, [s.l.], v. 4, n. 2, p.330-344, 2014. MDPI AG.

MATOS, Mateus Pimentel de et al. Efeito da massa e da forma de processamento das sementes no poder coagulante da moringa. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 22, n. 4, p.341-350, ago. 2014.

MEMELLI, Marina Santos. **Produção de estruvita ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) a partir da urina humana através de precipitação induzida por íons de magnésio**. 2019. 83 f.

Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2019.

MGBEMENA, N. M.; OBODO, G. A. Comparative analysis of proximate and mineral composition of Moringa oleifera root, leave and seed obtained in Okigwe Imo State, Nigeria. **Journal of Molecular Studies and Medicine Research**, [s.l.], v. 1, n. 2, p.57-62, 2016.

MIERZWA, J. C.; AQUINO, S. F.; VERAS, L. R. V. Remoção de Desreguladores Endócrinos. IN: Programa de pesquisa em saneamento básico, edital 5 (Prosab 5). Remoção de microorganismos emergentes e microcontaminantes orgânicos no tratamento de água para consumo humano. Valter Lucio de Pádua (coordenador). Rio de Janeiro: ABES, 2009.

MIHELICIC, J. R.; FRY, Lauren M.; SHAW, Ryan. Global potential of phosphorus recovery from human urine and feces. **Chemosphere**, [s.l.], v. 84, n. 6, p.832-839, ago. 2011. Elsevier BV.

MORALES, N. et al. Recovery of N and P from Urine by Struvite Precipitation Followed by Combined Stripping with Digester Sludge Liquid at Full scale. **Water**, [s.l.], v. 5, n. 3, p.1262-1278, 29 ago. 2013. MDPI AG.

MOREIRA, F. A. **Remoção de amônia em lixiviado de aterro sanitário como estruvita**. 2009. 68 fl. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.

NARASIAH, K. S.; VOGEL, A.; KRAMADHATI, N.N.. Coagulation of turbid waters using Moringa oleifera seeds from two distinct sources. **Water Science and Technology**: Water Supply, [s.l.], v. 2, n. 5-6, p.83-88, dez. 2002. IWA Publishing.

NASCIMENTO, R. F. et al. Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais - Fortaleza: Imprensa Universitária, 2014. 256 p. (Estudos da Pós-graduação) ISBN: 978-85-7485-186-0.

NDABIGENGESERE, Anselme; NARASIAH, K.subba; TALBOT, Brian G.. Active agents and mechanism of coagulation of turbid waters using Moringa oleifera. **Water Research**, [s.l.], v. 29, n. 2, p.703-710, fev. 1995. Elsevier BV.

NGIGI, Anastasia; MURAGURI, Brian M.. ICP-OES determination of essential and non-essential elements in Moringa oleifera, Salvia hispanica and Linum usitatissimum. **Scientific African**, Nairobi - Kenya, v. 6, n. 00165, p.1-6, Setembro, 2019.

NNADI, E.O. et al. Physicochemical properties of an acid ultisol subjected to different tillage practices and wood-ash amendment: Impact on heavy metal concentrations in soil and Castor plant. **Soil and Tillage Research**, [s.l.], v. 194, p.1-8, nov. 2019. Elsevier BV.

OHLINGER, K.N.; YOUNG, T.M.; SCHROEDER, E.D. Predicting struvite formation in digestion. **Water Research**, [s.l.], v. 32, n. 12, p.3607-3614, dez. 1998. Elsevier BV.

OLIVEIRA, N. T. et al. Tratamento de água com moringa oleífera como coagulante/floculante natural. **Revista Científica Faema**, [s.l.], v. 9, n. 1, p.373-382, 12 abr. 2018. Revista FAEMA.

ONU, 2014. Concise Report on the World Population Situation in 2014. Department of Economic and Social Affairs, Population Division, United Nations.

OTTERPOHL, R., 2001. Black, brown, yellow, grey- the new colors of sanitation. **Magazine of the International Water Association**, v. 21, p. 37-41.

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**. 2013. 231 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental: Mitigação de impactos ambientais) - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2013.

PALMQUIST, H. and JÖNSSON H. Urine, faeces, greywater and biodegradable solid waste as potential fertilisers. **Proceedings** of the 2nd International Symposium on Ecological Sanitation, GTZ, Eschborn, Germany, 2004.

PEDERSEN, Anne Juul. Characterization and electrodialytic treatment of wood combustion fly ash for the removal of cadmium. **Biomass and Bioenergy**, [s.l.], v. 25, n. 4, p.447-458, out. 2003. Elsevier BV.

PENETRA, R. G. **Pós tratamento físico-químico por flotação de efluentes de reatores anaeróbicos de manta de lodo (UASB)**. Dissertação – Escola de Engenharia de São Paulo. São Carlos – SP, 1998.

PRABHU, M.; MUTNURI, S. Cow urine as a potential source for struvite production. **Int J Recycl Org. Waste Agricult**, 3:49, 12p, 2014.

RAIMUNDO, C. C. M. **Ocorrência de interferentes endócrinos e produtos farmacêuticos nas águas superficiais da bacia do rio Atibaia**. 2007. 108 f. Dissertação (Mestrado em química) - Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Química. Campinas, São Paulo, 2007.

RAJJOU, L. et al. Seed germination and vigor. **Annual Review of Plant Biology**, [s.l.], v. 63, n. 1, p.507-533, 2 jun. 2012. Annual Reviews.

RAMOS, Renata O.; PATERNIANI, José E. S.; ZUMERLY, Henri R. Estudo da clarificação de água natural utilizando suspensão aquosa obtida com sementes de *Moringa oleifera* (clarification of water with low turbidity and moderate color using *Moringa oleifera* seeds). **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 2, n. 3, p.193-200, 15 dez. 2008. Universidade Estadual Paulista - Campus de Tupa.

RANASINGHE, E. et al. Human Urine as a Low Cost and Effective Nitrogen Fertilizer for Bean Production. **Procedia Food Science**, [s.l.], v. 6, p.279-282, 2016. Elsevier BV.

RAUCH, W. et al. Combining urine separation with waste design: an analysis using a stochastic model for urine production. **Water Research**, [s.l.], v. 37, n. 3, p.681-689, fev. 2003. Elsevier BV.

RONTELTAP, M.; MAURER, M.; GUJER, W. The behaviour of pharmaceuticals and heavy metals during struvite precipitation in urine. **Water Research**, [s.l.], v. 41, n. 9, p.1859-1868, maio 2007. Elsevier BV.

SAKTHIVEL, S. R.; TILLEY, E.; UDERT, K. M.. Wood ash as a magnesium source for phosphorus recovery from source-separated urine. **Science Of The Total Environment**, [s.l.], v. 419, p.68-75, mar. 2012. Elsevier BV.

SCHÖNNING, C.; LEEMING, R.; STENSTRÖM, T. A. Faecal contamination of source-separated human urine based on the content of faecal sterols. **Water Research**, [s.l.], v. 36, n. 8, p.1965-1972, abr. 2002. Elsevier BV.

SHIH, K.; YAN, H. The Crystallization of Struvite and Its Analog (K-Struvite) From Waste Streams for Nutrient Recycling. **Environmental Materials and Waste**, [s.l.], p.665-686, 2016. Elsevier.

SHU, L. et al. An economic evaluation of phosphorus recovery as struvite from digester supernatant, **Bioresource Technology**, v. 97, p.2211-2216, 2006.

TAPPI. Technical Association of the Pulp and Paper Industry. Official test method, wavelength of 266 nm. Determination of sodium, calcium, copper, iron and manganese in pulp and paper by atomic absorption spectroscopy. **TAPPI standard method T 266-om-02**.

UDERT, K. M.; LARSEN, T. A.; GUJER, Willi. Estimating the precipitation potential in urine-collecting systems. **Water Research**, [s.l.], v. 37, n. 11, p.2667-2677, jun. 2003. Elsevier BV.

VALVERDE, Karina Cardoso et al. Combined water treatment with extract of natural Moringa oleifera Lam and synthetic coagulant. **Ambiente & Água: an Interdisciplinary Journal of Applied Science**, [s.l.], v. 13, n. 3, p.1-10, 2018. Instituto de Pesquisas Ambientais em Bacias Hidrograficas (IPABHi).

VALVERDE, Karina Cardoso et al. Optimization of process conditions in water treatment through coagulation diagrams, using Moringa oleifera Lam and aluminium sulphate. **Desalination and Water Treatment**, [s.l.], v. 56, n. 7, p.1787-1792, 15 set. 2014. Informa UK Limited.

VIEIRA, Gleilson de França. **Determinação de macro e micronutriente de frutos de Moringa oleifera Lamark (parede interna e externa da casca) e sementes**. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

VIRK, A. K. et al. Development and efficacy analysis of a *Moringa oleifera* based potable water purification kit. **Journal of Water Process Engineering**, [s.l.], v. 27, p.37-46, fev. 2019. Elsevier BV.

VOUNDINKANA, J. C.; DEMEYER, A.; VERLOO, M. G. Availability of nutrients in wood ash amended tropical acid soils. **Environmental Technology**, London, v.19, p.1213-1221, 1998.

WERNER C., FALL P.A., SCHLICK J., MANG H.P. Reasons for and principles of ecological sanitation. **Proceedings**. 2nd International Symposium on Ecological Sanitation. 2003.

WILSENACH, J. A ; SCHUURBIERS, C.A.H.; VAN LOOSDRECHT, M. C. M. Phosphate and potassium recovery from source separated urine through struvite precipitation. **Water Research**, [s.l.], v. 41, n. 2, p.458-466, jan.2007. Elsevier BV.

WINKER, M.; VINNERÅS, B.; MUSKOLUS, A.; ARNOLD, U.; CLEMENS, J. Fertiliser products from new sanitation systems: Their potential values and risks. **Bioresource Technology**, v.100, p.4090-4096, 2009.

XAVIER, L. D. et al. Study of the recovery of phosphorus from struvite precipitation in supernatant line from anaerobic digesters of sludge. **Water Science and Technology**, [s.l.], v. 69, n. 7, p.1546-1551, 2014. IWA Publishing.

ZAID, Aziz Qannaf; GHAZALI, Suriati Binti. Dataset on physicochemical properties of particle-sized *Moringa oleifera* seed cake and its application as bio-coagulants in water treatment application. **Chemical Data Collections**, [s.l.], v. 24, p.100284-100290, dez. 2019. Elsevier BV.

ZANCHETA, P. G.; PENA, A.; GONÇALVES, R. F.; Desenvolvimento e validação de método para quantificação simultânea de ofloxacina, norfloxacin e ciprofloxacina em urina humana. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v.20, n.2, p. 307-314, 2015.

ZANCHETA, P. G. **Recuperação e tratamento da urina humana para uso agrícola**. 2007. 83 f. Dissertação (Mestrado) Curso de Engenharia Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2007. Disponível em: <http://portais4.ufes.br/posgrad/teses/tese_2648_Microsoft Word - Priscilla.pdf>. Acesso em: 10 out. 2017.

ZANG, Guo-long et al. Nutrient removal and energy production in a urine treatment process using magnesium ammonium phosphate precipitation and a microbial fuel cell technique. **Physical Chemistry Chemical Physics**, [s.l.], v. 14, n. 6, p.1978-1984, 2012. Royal Society of Chemistry (RSC).

APÊNDICE A

Tabela 1A- Resultados do Teste de Jarros - variação da velocidade de rotação (rpm) e concentração/dose de óxido de magnésio na urina humana

Rotação (rpm)	MgO:P	P Sobre-nadante (mg/L)	% Recuperação	pH Inicial	pH Final	Temp. Inicial (°C)	Temp. final (°C)	Condutividade inicial (mS)	Condutividade final (mS)
1º Amostragem									
-	Bruto	538,2	-	6,0	-	22,4	-	16,6	-
30	0:1	537,8	0,1	6,0	6,0	22,3	21,1	16,6	16,6
30	1:1	448,7	16,6	6,0	6,1	21	21,4	16,8	16,8
30	1.5:1	420,8	21,8	6,0	6,1	20,8	22,1	16,9	16,4
30	2:1	403,7	25,0	6,0	6,6	20,6	21,1	16,9	17,0
45	0:1	471,7	12,3	6,0	6,0	20,6	21,1	16,9	17,1
45	1:1	403,3	25,1	6,0	6,8	20,6	21,1	16,9	17,1
45	1.5:1	264,3	50,9	6,0	6,7	20,9	21,3	16,9	17,1
45	2:1	216,0	59,9	6,0	7,0	20,8	21,3	16,9	17,2
60	0:1	476,4	11,5	6,0	6,0	20,8	21,4	16,9	17,8
60	1:1	316,9	41,1	6,0	6,9	20,9	21,6	16,9	17,0
60	1.5:1	238,7	55,7	6,0	7,2	20,8	21,6	16,9	17,0
60	2:1	174,6	67,6	6,0	7,6	20,9	21,6	16,9	16,9
2º Amostragem									
-	Bruto	586,3	-	5,5	-	22,5	-	18,3	-
30	0:1	581,3	0,9	5,5	5,5	22,4	24,6	18,3	18,0
30	1:1	501,3	14,5	5,5	5,4	23,2	25,0	18,1	18,1
30	1.5:1	423,4	27,8	5,4	5,4	22,4	24,6	18,2	18,1
30	2:1	374,0	36,2	5,5	6,2	21,3	23,2	18,2	18,4
45	0:1	584,7	0,3	5,5	5,6	21,3	23,2	18,2	18,6
45	1:1	398,2	32,1	5,5	6,4	23,2	25,0	18,2	18,6
45	1.5:1	342,6	41,6	5,4	6,6	22,3	24,5	18,1	18,4
45	2:1	312,5	46,7	5,4	6,9	22,4	24,8	18,1	18,6
60	0:1	548,4	6,5	5,4	5,4	21,4	23,2	18,2	18,6
60	1:1	369,8	36,9	5,4	6,6	23,1	25,1	18,3	18,6
60	1.5:1	320,8	45,3	5,4	7,0	23,0	25,2	18,1	18,5
60	2:1	221,4	62,2	5,4	7,5	21,3	23,2	18,2	18,2
3º Amostragem									
-	Bruto	616,0	-	5,7	-	22,5	-	17,4	-
30	0:1	603,8	2,0	5,7	5,7	22,5	23,4	17,4	17,3
30	1:1	484,9	21,3	5,7	6,6	22,5	23,7	17,4	17,3
30	1.5:1	421,4	31,6	5,7	6,9	22,5	23,7	17,4	17,4
30	2:1	380,7	38,2	5,7	7,2	22,5	23,7	17,4	17,4
45	0:1	613,7	0,4	5,7	5,6	22,5	23,3	17,4	17,3
45	1:1	579,2	6,0	5,7	6,6	22,5	24,5	17,3	17,4
45	1.5:1	527,9	14,3	5,7	6,8	22,5	24,2	17,5	17,3
45	2:1	411,2	33,2	5,7	7,1	22,5	24,4	17,3	17,5
60	0:1	600,8	2,5	5,7	5,6	22,5	23,0	17,3	17,3
60	1:1	525,9	14,6	5,7	6,7	22,5	24,6	17,4	17,3
60	1.5:1	355,9	42,2	5,7	7,0	22,5	24,6	17,2	17,4
60	2:1	257,4	58,2	5,7	7,3	22,5	24,6	17,3	17,2

Fonte: Autora.

APÊNDICE B

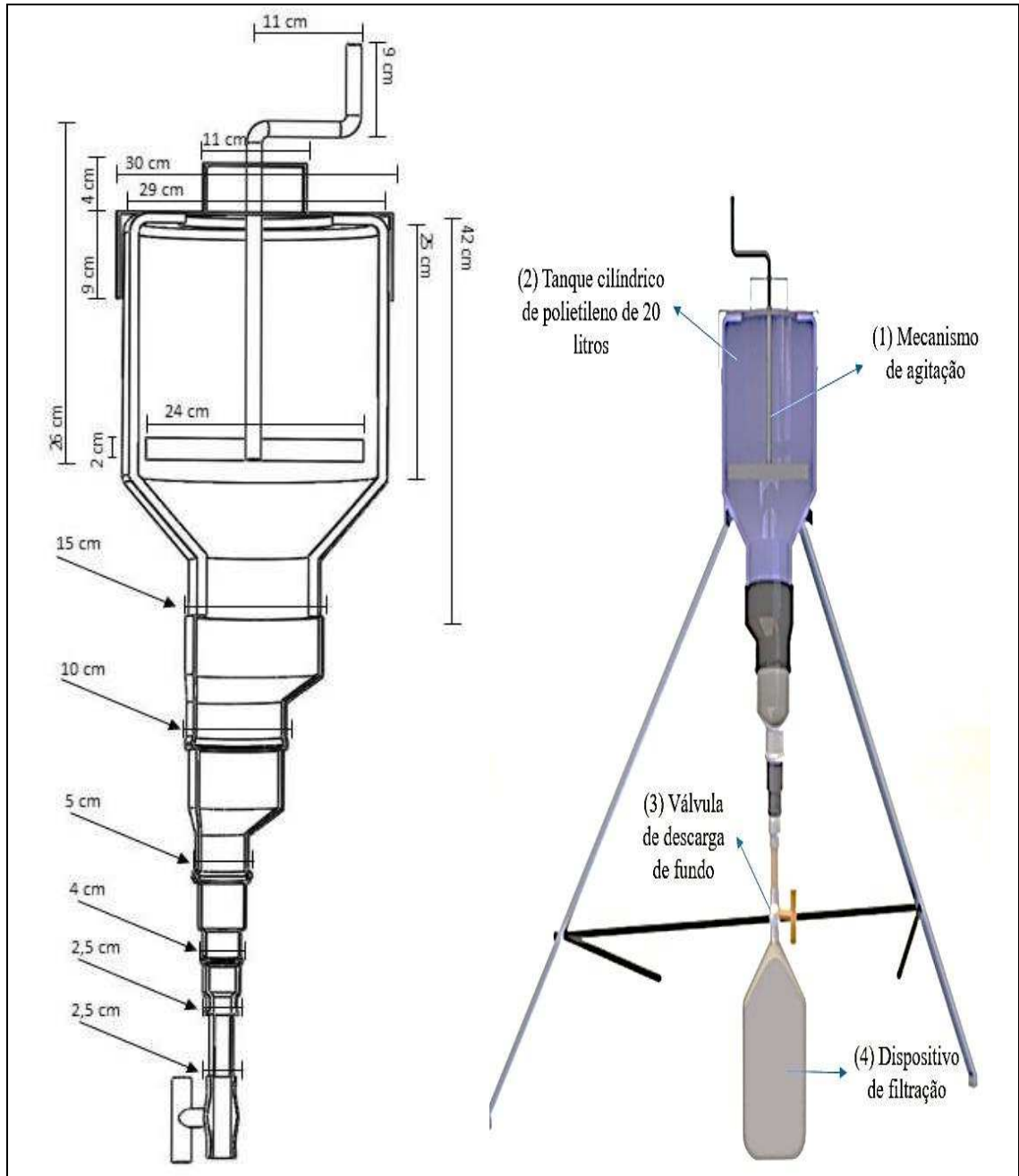
Tabela 1B -Resultados da análise do sobrenadante do teste de jarros com óxido de magnésio

Parâmetros		Unidade	Velocidade de rotação das pás do Jar-Test			
30 rpm						
Dose (MgO:P)			0:1	1:1	1,5:1	2:1
Cálcio	mg/L		50,3 ± 0,9	48,1 ± 0,1	45,0 ± 1,2	40,2 ± 0,6
Cloreto	g/L		25,1 ± 0,0	33,5 ± 0,0	28,6 ± 0,0	26,8 ± 0,0
Cobre	mg/L		0,3 ± 0,0	0,2 ± 0,0	0,8 ± 0,0	0,0 ± 0,0
Ferro	mg/L		1,3 ± 0,2	1,9 ± 0,0	1,9 ± 0,0	1,9 ± 0,2
Magnésio	mg/L		58 ± 10	97,8 ± 0,8	120,0 ± 2,5	131,3 ± 21,3
Manganês	mg/L		0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0
Potássio	mg/L		433 ± 9,0	486,0 ± 8,0	458,9 ± 7,0	532,5 ± 10,5
Sódio	g/L		1,8 ± 0,0	2,0 ± 0,0	1,9 ± 0,0	1,5 ± 0,0
Fósforo	mg/L		538,2 ± 9,8	448,7 ± 5,4	411,4 ± 7,3	375,3 ± 6,4
Condutividade	mS/cm		17,7	17,7	17,6	17,9
Cor (V. A.)	ptCo		2203	2520	2473	2695
DBO	g/L		11,9	11,2	17,0	10,7
DQO	g/L		14,2	13,6	13,8	11,8
pH	-		5,7	6,6	6,9	6,8
Turbidez	NTU		23,5	36,3	32,0	44,8
45 rpm						
Dose (MgO:P)			0:1	1:1	1,5:1	2:1
Cálcio	mg/L		47,8 ± 0,1	40,3 ± 0,0	34,5 ± 0,3	34,5 ± 0,2
Cloreto	g/L		33,6 ± 0,0	26,7 ± 0,0	30,3 ± 0,0	34,6 ± 0,0
Cobre	mg/L		0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0
Ferro	mg/L		0,8 ± 0,0	0,5 ± 0,0	0,5 ± 0,1	0,7 ± 0,0
Magnésio	mg/L		58,8 ± 2,3	197,3 ± 11,8	214,0 ± 22,5	243,4 ± 2,1
Manganês	mg/L		0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0
Potássio	mg/L		599,5 ± 3,5	535,5 ± 5,0	534,0 ± 7,0	479,0 ± 1,0
Sódio	g/L		1,4 ± 0,0	2,0 ± 0,0	2,0 ± 0,0	1,8 ± 0,0
Fósforo	mg/L		538,2 ± 9,8	403,4 ± 8,9	269,4 ± 5,6	216,0 ± 4,3
Condutividade	mS/cm		17,9	17,7	17,6	18,2
Cor (V. A.)	ptCo		2425	3069	3147	3415
DBO	g/L		12,9	13,5	12,8	11,3
DQO	g/L		13,6	14,0	15,2	13,5
pH	-		5,7	6,7	7,0	7,4
Turbidez	NTU		41,7	58,1	81,8	75,8
60 rpm						
Dose (MgO:P)			0:1	1:1	1,5:1	2:1
Cálcio	mg/L		32,2 ± 0,3	33,6 ± 0,2	32,9 ± 0,1	33,7 ± 0,1
Cloreto	g/L		58,8 ± 0,0	52,0 ± 0,0	40,2 ± 0,0	45,2 ± 0,0
Cobre	mg/L		0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0
Ferro	mg/L		0,2 ± 0,1	0,5 ± 0,0	1,1 ± 0,0	0,1 ± 0,0
Magnésio	mg/L		70,3 ± 3,8	191,3 ± 2,3	208,3 ± 4,3	183,3 ± 4,3
Manganês	mg/L		0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0
Potássio	mg/L		347,0 ± 41,0	481,0 ± 16,0	492,0 ± 22,0	398,5 ± 6,5
Sódio	g/L		1,3 ± 0,0	2,1 ± 0,0	1,8 ± 0,0	1,7 ± 0,0
Fósforo	mg/L		538,2 ± 9,8	318,1 ± 3,7	190,4 ± 9,7	174,5 ± 2,8
Condutividade	mS/cm		17,8	18,0	18,0	18,0
Cor (V. A.)	ptCo		2360	2911	3126	3199
DBO	g/L		9,1	15,2	17,1	13,0
DQO	g/L		12,5	14,0	16,2	12,8
pH	-		5,7	6,9	7,2	7,6
Turbidez	NTU		35,0	56,3	61,5	70,6

Fonte: Autora.

APÊNDICE C

Figura 1C- Protótipo de recuperação de nutrientes da urina humana em forma de estruvita



Fonte: Autora.