

**KLEVER CRISTIANO SILVEIRA**

**PROCESSO E VIABILIDADE DA RECUPERAÇÃO DE AMÔNIA LIBERADA DE  
CAMA DE AVIÁRIO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Reinaldo Bertola Cantarutti

Coorientadores: Deusanilde de Jesus Silva  
Edson Marcio Mattiello

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2022**

**KLEVER CRISTIANO SILVEIRA**

**PROCESSO E VIABILIDADE DA RECUPERAÇÃO DE AMÔNIA LIBERADA DE  
CAMA DE AVIÁRIO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 15 de dezembro de 2022.

Assentimento:

---

Klever Cristiano Silveira  
Autor

---

Reinaldo Bertola Cantarutti  
Orientador

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

T

S587p  
2022

Silveira, Klever Cristiano, 1992-  
Processo e viabilidade da recuperação de amônia liberada  
de cama de aviário / Klever Cristiano Silveira. – Viçosa, MG,  
2022.  
1 dissertação eletrônica (94 f.): il. (algumas color.).

Inclui anexos.  
Orientador: Reinaldo Bertola Cantarutti.  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,  
Departamento de Solos, 2022.  
Referências bibliográficas: f. 90-92.  
DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2024.216>  
Modo de acesso: World Wide Web.

1. Amônia como fertilizante. 2. Amônia - Síntese.  
3. Adubos e fertilizantes orgânicos. I. Cantarutti, Reinaldo  
Bertola, 1954-. II. Universidade Federal de Viçosa.  
Departamento de Solos. Programa de Pós-Graduação em Solos e  
Nutrição de Plantas. III. Título.

CDD 22. ed. 631.841

A Deus, luz em meu caminho.

Aos meus pais, meu espelho e fonte de toda minha energia.

Aos meus irmãos e amigos que torceram e ajudaram na obtenção deste sonho.

Ao meu grande e eterno amigo Eduardo Henrique Francisco de Souza (*in memoriam*)

**Dedico**

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me guiado e iluminado por todo este período, que me trouxe perseverança e inspiração.

Aos meus pais Sebastião Vicente da Silveira e Maria das Dores Pereira Silva e aos meus irmãos, por terem depositado toda confiança em meus estudos e confiado em meu trabalho durante estes 15 anos de estudo.

À Universidade Federal de Viçosa, ao Departamento de Solos e à Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, pela oportunidade de realização do curso de doutorado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio através da concessão da bolsa de estudos.

Ao professor Reinaldo Bertola Cantarutti, por ter acreditado em meu potencial, confiado nos meus trabalhos realizados e pelo apoio financeiro, sem medir esforços, em prol ao desenvolvimento da tecnologia.

À professora e coorientadora Deusanilde de Jesus Silva, pelas sugestões durante o trabalho da tese, dos momentos de incertezas, das conversas de vida.

À Fabiane Ballotin, pela amizade construída, pelos conselhos, apoio financeiro e torcida intensa pelo êxito do trabalho de tese.

Ao Rodrigo Motta pelo empenho e apoio durante todo o processo de desenvolvimento do trabalho e escalonamento do protótipo.

Ao professor e coorientador Edson Marcio Mattiello, pela “paciência e compreensão” durante a execução do experimento no laboratório de fertilizantes, pelos conselhos e ensinamentos da vida acadêmica e empresarial, e a concessão de bolsa.

Ao professor Maurício Fontes, pela ajuda durante as análises laboratoriais, pelos ensinamentos e principalmente pelo apoio financeiro durante minha estadia nos últimos meses.

À minha namorada Raissa Alves, por me acompanhar, conversar, aconselhar e confiar no meu trabalho, ao carinho e paciência em escutar minhas ideias de jovem pesquisador.

A todos os amigos de Florestal, Viçosa e do Departamento de Solos, que me ajudaram e permaneceram sempre na torcida, inclusive nos momentos de descontração.

Ao meu eterno amigo Eduardo Henrique Francisco de Souza (*in memoriam*), que me possibilitou ter a certeza de que a humildade é tudo na vida.

A todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para o êxito deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

## **BIOGRAFIA**

Klever Cristiano Silveira, Engenheiro Agrônomo pela Universidade Federal de Viçosa. Coursou Agropecuária na Escola Agrotécnica Federal de São João Evangelista (atual IFMG) obtendo título de Técnico Agrícola em janeiro de 2011.

Durante a graduação na Universidade Federal de Viçosa *Campus* Florestal, iniciou seus trabalhos na área de pesquisa, trabalhando com Bactérias Promotoras de Crescimento de Plantas julho de 2011, inicialmente como estagiário no Setor de Floricultura, sob a orientação da Prof (a). Lílian Estrela Borges Baldotto. Foi bolsista do FUNARBIC/CNPq/UFV por um ano, PROBIC/FAPEMIG por um ano e FUNARBEX/CNPq/UFV por um ano.

Obteve o título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação de Ecossistemas Naturais e Agrários da Universidade Federal de Viçosa *Campus* Florestal em março de 2016, sob a orientação da Prof (a). Lílian Estrela Borges Baldotto.

Ingressou no Programa de Pós-Graduação, a nível de doutorado, em Solos e Nutrição de Plantas da Universidade Federal de Viçosa em março de 2018, sob orientação do Prof. Reinaldo Bertola Cantarutti.

*“Não precisamos apagar a luz do próximo para que a nossa brilhe”*

*Mahatma Gandhi*

## RESUMO

SILVEIRA, Klever Cristiano, D.Sc. Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2022. **Processo e viabilidade da recuperação de amônia liberada de cama de aviário.** Orientador: Reinaldo Bertola Cantarutti. Coorientador(a): Deusanilde de Jesus Silva. Coorientador: Edson Marcio Mattiello.

Apesar de ser um dos principais *players* da produção mundial de alimentos, o Brasil importa entre 85 a 90 % dos fertilizantes que utiliza na agricultura. Portanto, o principal gargalo do mercado nacional de fertilizantes é a dependência das importações. Uma alternativa, para fertilizantes nitrogenados, é a recuperação da amônia ( $\text{NH}_3$ ) em sistemas industriais e agroindustriais. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi desenvolver processo para recuperar  $\text{NH}_3$  por meio de amonização de ácidos e avaliar viabilidade técnica e econômica de implantação de planta piloto de produção de fertilizantes na cidade de Viçosa-MG. No capítulo 1 foram descritos 2 experimentos, sendo que no primeiro experimento desenvolveu-se um sistema para produzir amônia pela destilação de  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  com intuito de definir as concentrações das soluções de  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  e mistura de  $\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$  que variaram de 4,0 a 14,38 mol  $\text{L}^{-1}$ . Maior viabilidade no processo de amonização, máxima captura de N- $\text{NH}_3$ , foi obtida com  $\text{H}_3\text{PO}_4$  9,0 mol  $\text{L}^{-1}$ ;  $\text{H}_2\text{SO}_4$  9,6 mol  $\text{L}^{-1}$  e  $\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$  9,0 mol  $\text{L}^{-1}$ . No segundo experimento, desenvolveu-se um protótipo capaz de recuperar  $\text{NH}_3$  de resíduos industriais e agroindustriais. Utilizou-se como fonte de  $\text{NH}_3$  a cama de aviário, obtida de galpões do sistema *dark house*, acondicionada em reatores de amonificação. A amônia foi carregada por fluxo contínuo de ar e borbulhada em recipientes contendo as soluções de  $\text{H}_3\text{PO}_4$  9,0 mol  $\text{L}^{-1}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  9,6 mol  $\text{L}^{-1}$  e  $\text{H}_2\text{SO}_4$  1,19 mol  $\text{L}^{-1}$  (ácido sulfúrico biogênico, obtido pela oxidação de enxofre elementar por *Acidithiobacillus thiooxidans*),  $\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$  (4,5 mol  $\text{L}^{-1}$  para ambos os ácidos),  $\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$  (2,38 e 1,19 mol  $\text{L}^{-1}$ , nesta ordem) e  $\text{HNO}_3$  4,0 mol  $\text{L}^{-1}$ . O protótipo apresentou eficiência de amonização de 93 a 100%, demonstrando aptidão para uso de resíduo sólido de agroindústrias e resíduo líquido de indústrias. Valores de pH, teores de N, P, S e picos característicos de fases minerais dos sais sintetizados, quando comparado aos reagentes analíticos  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{NH}_4\text{SO}_4$  e  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ , confirmaram a formação dessas fases pela amonização. Os difratogramas de raios X da mistura de  $\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$ , indicaram a síntese de sal composto por  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ , e  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ , e adicionalmente, confirma a hipótese da síntese dos sais Diamônio fosfato sulfato (DAFS), Triamônio fosfato sulfato (T3AFS) ou Tetramônio fosfato sulfato (T4AFS). No capítulo 2, realizou-se estudo de viabilidade técnica e

econômica para implantação de uma planta piloto de recuperação de  $\text{NH}_3$  e produção de fertilizantes organominerais a partir de resíduos industriais e agroindustriais na cidade de Viçosa-MG. Para a produção, utilizou-se como resíduo fonte de amônia a cama de aviário, sendo processada em reatores de amonificação e ao final do processo, obtido fertilizantes fluidos e sólido (fertilizante organomineral). O estudo de validação de mercado identificou a potencial aceitação dos produtos para cultivos de café, milho e olerícolas na região de Viçosa-MG. Para tanto, foram entrevistados 17 produtores, dos quais 90% utilizam fertilizantes inorgânicos (N, P e K) e 50% utilizam fertilizantes orgânicos da própria propriedade. O fertilizante organomineral (FO) apresentou custo de produção de  $\text{R\$ kg}^{-1} = 1,96$ , com valor de venda de  $\text{R\$ kg}^{-1} = 2,50$ , portanto com margem de lucro de 20%. O fertilizante líquido (FL) apresentou um custo de produção de  $\text{R\$4,05 L}^{-1}$  e valor de venda de  $\text{R\$16,21 L}^{-1}$ . Com processamento mensal médio no Ano 1 de 82 t do FO e  $10 \text{ m}^3$  do FL, estima-se faturamento de  $\text{R\$ 4,3 milhões}$ . No Ano 2 com processamento mensal de 107 t do FO e  $12 \text{ m}^3$  de Aqua estima-se faturamento de  $\text{R\$ 5,4 milhões}$  e no Ano 3, com  $129 \text{ t mês}^{-1}$  de FO e  $13,6 \text{ m}^3 \text{ mês}^{-1}$  de Aqua projeta-se um faturamento de  $\text{R\$ 8,2 milhões}$ . Os indicadores de fluxo de caixa (TMA de 12%) indicaram a viabilidade de investimento, sendo esta maior que a taxa SELIC avaliada durante o estudo (2022). Com um TIR (Taxa interna de retorno) de 34% e VPL (Valor presente líquido) de  $\text{R\$206.045,39}$  que indicou o potencial ganho de investimento na fábrica e TRC (Breaken even/PayBack) de 1 ano e 11 mês. RBC%, obteve um resultado de 11%, onde a cada  $\text{R\$1,00}$  investido é esperado retorno de  $\text{R\$1,11}$ .

A partir dos trabalhos desenvolvidos, conclui-se que é possível recuperar amônia volatilizada de diferentes sistemas, seja agroindustrial ou industrial. Neste mesmo sentido, é possível produzir sais de valor agrônômico com diferentes garantias nutricionais que podem ser customizados e aplicados as diferentes culturas agrícolas. Da mesma forma conclui-se a potencialidade de escalonar economicamente o processo de recuperação e produzir fertilizantes organominerais e soluções para aplicação foliar.

Palavras Chaves: Recuperação de amônia. Fertilizantes. Organomineral.

## ABSTRACT

SILVEIRA, Klever Cristiano, D.Sc. Universidade Federal de Viçosa, December, 2022. **Process and feasibility of recovering ammonia released from poultry litter.** Adviser: Reinaldo Bertola Cantarutti. Co-advisers: Deusanilde de Jesus Silva. Co-advisers: Edson Marcio Mattiello.

Despite being one of the main players in global food production, Brazil imports between 85 and 90% of the fertilizers it uses in agriculture. Therefore, the main bottleneck in the national fertilizer market is dependence on imports. An alternative to nitrogen fertilizers is the recovery of ammonia ( $\text{NH}_3$ ) in industrial and agro-industrial systems. In this context, the objective of this work was to develop a process to recover  $\text{NH}_3$  through acid ammonization and evaluate the technical and economic feasibility of implementing a pilot fertilizer production plant in the city of Viçosa-MG. In chapter 1, 2 experiments were described, and in the first experiment a system was developed to produce ammonia through the distillation of  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  with the aim of defining the concentrations of solutions of  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  and a mixture of  $\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$ , which varied from 4.0 to 14.38  $\text{mol L}^{-1}$ . Greater viability in the ammoniation process, maximum capture of N- $\text{NH}_3$ , was obtained with  $\text{H}_3\text{PO}_4$  9.0  $\text{mol L}^{-1}$ ;  $\text{H}_2\text{SO}_4$  9.6  $\text{mol L}^{-1}$  and  $\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$  9.0  $\text{mol L}^{-1}$ . In the second experiment, a prototype capable of recovering  $\text{NH}_3$  from industrial and agro-industrial waste was developed. Poultry litter, obtained from dark house system sheds, stored in ammonification reactors, was used as a source of  $\text{NH}_3$ . The ammonia was carried by a continuous air flow and bubbled into containers containing solutions of  $\text{H}_3\text{PO}_4$  9.0  $\text{mol L}^{-1}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  9.6  $\text{mol L}^{-1}$  and  $\text{H}_2\text{SO}_4$  1.19  $\text{mol L}^{-1}$  (biogenic sulfuric acid, obtained by oxidation of elemental sulfur by *Acidithiobacillus thiooxidans*),  $\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$  (4.5  $\text{mol L}^{-1}$  for both acids),  $\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$  (2.38 and 1.19  $\text{mol L}^{-1}$ , in that order) and  $\text{HNO}_3$  4.0  $\text{mol L}^{-1}$ . The prototype showed an ammoniation efficiency of 93 to 100%, demonstrating suitability for using solid waste from agro-industries and liquid waste from industries. pH values, N, P, S contents and characteristic peaks of mineral phases of the synthesized salts, when compared to the analytical reagents  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{NH}_4\text{SO}_4$  and  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ , confirmed the formation of these phases by ammonization. The X-ray diffractograms of the mixture of  $\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$  indicated the synthesis of a salt composed of  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ , and  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ , and additionally confirms the hypothesis of the synthesis of the salts Diammonium phosphate sulfate (DAFS), Triammonium sulfate phosphate (T3AFS) or Tetrammonium sulfate phosphate (T4AFS). In chapter 2, a technical and economic feasibility study was carried out for the implementation of a pilot plant for the recovery of  $\text{NH}_3$  and the production of organomineral

fertilizers from industrial and agro-industrial waste in the city of Viçosa-MG. For production, poultry litter was used as a source of ammonia, being processed in ammonification reactors and at the end of the process, fluid and solid fertilizers (organomineral fertilizer) were obtained. The market validation study identified the potential acceptance of products for coffee, corn and vegetable crops in the Viçosa-MG region. To this end, 17 producers were interviewed, of which 90% use inorganic fertilizers (N, P and K) and 50% use organic fertilizers from their own property. Organomineral fertilizer (FO) had a production cost of R\$ kg<sup>-1</sup> = 1.96, with a sales value of R\$ kg<sup>-1</sup> = 2.50, therefore with a profit margin of 20%. Liquid fertilizer (FL) had a production cost of R\$4.05 L<sup>-1</sup> and a sales value of R\$16.21 L<sup>-1</sup>. With average monthly processing in Year 1 of 82 t of FO and 10 m<sup>3</sup> of FL, estimated revenues of R\$ 4.3 million. In Year 2, with monthly processing of 107 t of FO and 12 m<sup>3</sup> of Aqua, revenues of R\$ 5.4 million are estimated and in Year 3, with 129 t month<sup>-1</sup> of FO and 13.6 m<sup>3</sup> month<sup>-1</sup> of Aqua revenue of R\$8.2 million is projected. Cash flow indicators (12% MARR) indicated investment viability, which was higher than the SELIC rate assessed during the study (2022). With an IRR (Internal Rate of Return) of 34% and NPV (Net Present Value) of R\$206,045.39, which indicated the potential gain from investment in the factory and TRC (Broken Even/PayBack) of 1 year and 11 months. RBC%, obtained a result of 11%, where for every R\$1.00 invested, a return of R\$1.11 is expected. From the work carried out, it is concluded that it is possible to recover volatilized ammonia from different systems, whether agro-industrial or industrial. In the same sense, it is possible to produce salts of agronomic value with different nutritional guarantees that can be customized and applied to different agricultural crops. Likewise, the potential to economically scale the recovery process and produce organomineral fertilizers and solutions for foliar application is concluded.

Keywords: Ammonia recovery. Fertilizers. Organomineral.

## LISTA DE FIGURAS

**Figura 1.** Representação esquemática do sistema de amonificação e amonização de ácidos. E1: entrada de ar, E2: entrada da fonte de NH<sub>3</sub>, E3: entrada de ar-NH<sub>3</sub>, R1: reator de amonificação, R2: reator de amonização, S1: saída de ar-NH<sub>3</sub> e conexão dos reatores (mangueira de 0,5 mm de diâmetro), S2:saída de ar.

**Figura 2.** Bomba para produção de ar (A), controlador de refluxo (B), purificador (C) e umidificador (D).

**Figura 3.** Recipientes polietileno de alta densidade que constituíram o reator de amonificação (A), entrada de ar (B), e saída do ar-NH<sub>3</sub> dos reatores (C).

**Figura 4.** Sistema desumidificador composto por: câmara de resfriamento (A) com detalhe do interior com mangueira enrolada e bolsas de gelo imersos em água (B), câmara de condensação (C) com detalhe do recipiente de coleta da água condensada (D).

**Figura 5.** Duto principal (A), reator de amonização (B), duto secundário de distribuição de gases para os reatores (C), duto de exaustão de gases (D).

**Figura 6.** Reator de amonização (A) com detalhes das conexões para entrada do ar-NH<sub>3</sub> (B) e saída de ar e despressurização (C).

**Figura 7.** Aumento da precipitação de sais com concentrações crescentes das soluções de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>

**Figura 8.** Formação de produto de aspecto pastoso a partir do processo de amonização da solução de ácido fosfórico.

**Figura 9.** Difratomogramas de raios X para o sal sintetizado pela amonização da solução de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 9,0 mol L<sup>-1</sup> (MAP-SIM) e do reagente analítico NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> (MAP-PA) da VETEC<sup>®</sup>.

**Figura 10.** Difratomogramas de raios X para o sal sintetizado pela amonização da solução de 6 mol L<sup>-1</sup> H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (DAP-SIM) e para o reagente analítico (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> (DAP-PA) da VETEC<sup>®</sup>

**Figura 11.** Difratomogramas de raios X para o sal sintetizado pela amonização da solução de 9,6 mol L<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (SA-SIM) e para o reagente analítico (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (SA-PA) da FMAIA<sup>®</sup>.

**Figura 12.** Difratomogramas de raios X para o sal sintetizado pela amonização da solução mista H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 9,0 mol L<sup>-1</sup> (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-SIM) e dos reagentes analíticos analítico fosfato monoamônio (MAP-PA) e diamônio (DAP-PA) da VETEC<sup>®</sup> e sulfato de amônio (SA-PA) da FMAIA<sup>®</sup>.

**Figura 13.** Representação esquemática do sistema de amonificação -amonização. Bomba de ar (A), Controladores de refluxo (B), Purificador com H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (C), Umidificador (D), Reatores de amonificação (R1 e R2), sistema desumificador (Cs1 e Cs2), duto principal (Dp), duto secundário (Ds), Reatores de amonização (RAs).

**Figura 14.** Detalhe da formação de sais na extremidade do duto secundário.

**Figura 15.** Análise dos teores de amônia no fluxo de ar-NH<sub>3</sub> durante a execução do teste de protótipo

**Figura 16.** Detalhe da vedação da tampa do reator de amonificação

**Figura 17.** Difratomogramas de raios X para o sal sintetizado pela amonização da solução de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 9 mol L<sup>-1</sup> (MAP-CF) e do reagente analítico NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> (MAP-Padrão) da VETEC<sup>®</sup>.

**Figura 18.** Difratomogramas de raios X para o sal sintetizado pela amonização da solução de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> 9 mol L<sup>-1</sup> (DAP-CF) e para o reagente analítico (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> (DAP-PA) da VETEC<sup>®</sup>

**Figura 19.** Difratomogramas de raios X para o sal sintetizado pela amonização da solução de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 4,0 mol L<sup>-1</sup> (NA-CF) e para o reagente analítico NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> (NA-PA) da FMAIA<sup>®</sup>.

**Figura 20.** Difratomogramas de raios X para o sal sintetizado pela amonização da solução mista H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 9 mol L<sup>-1</sup> (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-CF), H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 3,57 mol L (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-CF) e dos reagentes analíticos analítico fosfato monoamônio (MAP-Padrão) e diamônio (DAP-PA) da VETEC<sup>®</sup> e sulfato de amônio (SA-PA) da FMAIA

**Figura 21.** Difratomogramas de raios X para o sal sintetizado pela amonização da solução de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1,19 mol L<sup>-1</sup> (SAb-CF) e para o reagente analítico (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (SA-PA) da FMAIA<sup>®</sup>.

**Figura 22.** Balanço de massa dos produtos fluídos e orgânicos

## LISTA DE TABELAS

**Tabela 1.** Reações químicas de amonização do  $\text{H}_3\text{PO}_4$  e  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , isoladamente ou combinados, com a massas molecular (*mM*) e os teores de N, P e S dos sais produtos

**Tabela 2.** Concentrações das soluções de ácido fosfórico, ácido sulfúrico e a mistura desses ácidos na relação molar 1:1.

**Tabela 3.** Cor da solução ácida amonizada, acidez da solução amonizada ( $\text{pH}_{\text{am}}$ ), tempo para completar a amonização dos ácidos ( $t_{\text{Ram}}$ ), rendimento e eficiência da amonização (EA)

**Tabela 4.** Teores e relação de N, P e S dos sais formados, acidez ( $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ ) de solução dos sais sintetizados, equivalente a  $1 \text{ mol L}^{-1}$  de acordo com as soluções ácidas

**Tabela 05.** Cor da solução ácida amonizada, acidez da solução amonizada ( $\text{pH}_{\text{am}}$ ), rendimento e eficiência da amonização

**Tabela 6.** Teores e relação de N, P e S dos sais formados e acidez ( $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ ) de solução dos sais sintetizados, equivalente a  $1 \text{ mol L}^{-1}$  de acordo com as soluções ácidas

**Tabela 7.** Cor da solução ácida amonizada, acidez da solução amonizada ( $\text{pH}_{\text{am}}$ ), rendimento e eficiência da amonização (EA)

**Tabela 8.** Teores e relação de N, P e S dos sais formados, acidez ( $\text{pH}$ ) de solução dos sais sintetizados, equivalente a  $1 \text{ mol L}^{-1}$  de acordo com as soluções ácidas

**Tabela 9.** Balanço de massa Linha Aqua NPS (09-05-06)

**Tabela 10.** Balanço de massa linha Organo (14-02-10)

**Tabela 11.** Discriminação CAPEX – ANO 1

**Tabela 12.** Discriminação OPEX – ANO 1

**Tabela 13.** Fluxo de caixa para o Ano 1, Ano 2 e Ano 3 da planta piloto

**Tabela 14.** Resultados dos indicadores de viabilidade.

## Sumário

1	INTRODUÇÃO GERAL .....	17
2	Capítulo I - Desenvolvimento de processo e de protótipo para recuperação de amônia liberada de cama de aviário .....	19
2.1	RESUMO .....	20
2.2	ABSTRACT .....	22
2.3	INTRODUÇÃO.....	24
2.4	MATERIAL E MÉTODOS.....	27
2.4.1	Experimento 1. Simulação de produção e captura de amônia.....	27
2.4.2	Experimento 2. Captura de amônia a partir da cama de aviário .....	32
2.4.3	Experimento de amonificação e amonização .....	36
2.5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	39
2.5.1	Experimento 1. Simulação da captura de amônia .....	39
2.5.2	Experimento 2. Captura de amônia a partir da “compostagem” de cama de frango.....	46
2.6	CONCLUSÃO.....	59
3	Capítulo II – EVTE: Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica do processo para recuperação e reuso da amônia da cama de aviário.....	60
3.1	RESUMO .....	61
3.2	INTRODUÇÃO.....	63
3.1	OBJETIVOS.....	64
3.1.1	Objetivos geral .....	64
3.1.2	Objetivo específicos .....	64
3.2	JUSTIFICATIVA .....	64
3.3	REVISÃO DE LITERATURA .....	65
3.3.1	Mercados de Fertilizantes Fluidos.....	65
3.3.2	Mercado de fertilizantes Organominerais .....	65
3.3.3	Produção avícola .....	66
3.3.4	Mercado do café .....	66
3.4	METODOLOGIA .....	68

3.4.1	Procedimento metodológicos .....	68
3.4.2	Tecnologia proposta .....	68
3.4.3	Fluxo de Caixa de Investimento e Orçamentação .....	68
3.4.4	Indicadores de Viabilidade Econômica e Financeira de Projetos ....	69
3.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	75
3.5.1	Tecnologia proposta .....	75
3.5.2	Fluxo de Caixa de Investimento e Orçamentação .....	78
3.5.3	Avaliação dos Indicadores de Viabilidade Econômica e financeira do Projeto .....	84
3.6	CONCLUSÃO.....	89
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	90
5	ANEXOS.....	93
5.1	Anexo 1 – Questionário produtores (B2C).....	93
5.2	Anexo 2 – Questionário Indústrias (B2B).....	94

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

A síntese da amônia desenvolvida em escala laboratorial por Fritz Haber e Robert Le Rossignol em 1909 proporcionou ao longo das décadas seguintes a expansão técnica, científica e social, garantindo principalmente a segurança alimentar mundial (Chagas, 2007). Esse processo possibilitou o aumento da produção de fertilizantes nitrogenados e, conseqüentemente, a intensificação da produção de alimentos que foi fundamental para atender a crescente demanda devido ao aumento da população mundial, que em 2022 alcançou o marco de 8,0 bilhões de pessoas.

A amônia é amplamente utilizada na composição de produtos industriais tais como detergentes, removedores de cera, indústria têxtil, indústria de couro, indústria de borracha, como gás refrigerante de câmaras frias e, parte mais expressiva, na indústria de fertilizantes. Estima-se que 80 % de toda amônia produzida nas indústrias seja utilizada na produção dos fertilizantes, sendo fosfato monoamônio, fosfato diamônio, sulfato de amônio, nitrato de amônio e uréia (maiores demandas no mercado).

No Brasil mais de 90 % dos fertilizantes consumidos são importados (Governo Federal, 2021). Em 2020, por exemplo, essa fração correspondeu a cerca de 29,4 milhões de toneladas (Mt) (GlobalFert, 2021), das quais, 11,6 Mt foram de fertilizantes que utilizam amônia como matéria-prima no seu processo de produção, dentre eles: ureia e monoamônio fosfato. Assim, o principal gargalo do mercado nacional de fertilizantes é a dependência das importações e a centralização dos fornecedores das principais fontes de matérias-primas na China, Índia, Rússia, Estados Unidos e Indonésia. Essa fragilidade preocupa o setor do agronegócio e deixa o mercado brasileiro vulnerável às oscilações do mercado externo de fertilizantes.

A fixação industrial de  $\text{NH}_3$  é baseada na reação do nitrogênio atmosférico com o hidrogênio, sendo bastante onerosa devido ao emprego de elevadas temperaturas e pressão; queima de combustíveis fósseis e alto gasto energético. Grande parte desta energia está relacionada à produção de hidrogênio necessário para a reação. O consumo mundial de energia para produção de fertilizantes corresponde a cerca de 2 %, sendo que aproximadamente 92,5 % deste montante é destinado para a produção de fertilizantes nitrogenados. Nessa produção as principais fontes energéticas são o gás natural, gás de refinaria e nafta (Brasil, 2021).

O gás natural é a fonte mais utilizada nas plantas de síntese da  $\text{NH}_3$ , sendo que cerca de 5 % da produção mundial de gás natural é consumida pelo processo de fixação da amônia

(Garcia et al. 2013). O aumento da demanda energética nos principais países produtores e conflitos geopolíticos entre países com grandes estoques de gás natural favorecem o aumento dos custos de produção de fertilizantes. Além disso, esta produção contribui de forma significativa com o impacto ambiental, considerando que para cada tonelada de  $\text{NH}_3$  fixada cerca de 0,79 t de  $\text{CO}_2$  é produzida pela queima do gás natural.

A fim de mitigar os impactos ambientais causados pela amônia  $\text{NH}_3$  trabalhos têm buscado desenvolver métodos de sua captura em sistemas agroindustriais, principalmente na produção de aves de corte em sistemas do tipo *Dark House*. Os métodos empregados são a partir da captura de  $\text{NH}_3$  por soluções ácidas (Wood and van Heyst, 2016), biofiltros *in natura*, ozonizados ou oxidados (Oviedo-Rondón, 2008; Akdeniz; Janni, 2012; Showqi et al. 2016; Wang et al., 2010).

Outros métodos empregados na recuperação da  $\text{NH}_3$  são aplicados aos sistemas industriais que possuem o processo de coqueificação. Neste processo durante a destilação seca da hulha (carvão mineral) surge a “água amoniacal”. A fração de  $\text{NH}_3$  volatilizada do resíduo pode ser recuperada por meio de três processos conhecidos como processo de sulfato de amônio, processo Phosam e processo de lavagem com água. No processo de Phosam, a  $\text{NH}_3$  volatilizada é absorvida por contato direto com uma solução aquosa de fosfato de amônio, fosfato diamônio e fosfato triamônio. No processo de sulfato de amônio o gás  $\text{NH}_3$  entra em contato com uma solução de ácido sulfúrico (Chagas, 2007; Garcia et al. 2013; Santos, 2020), e no processo de lavagem com água, o gás é submetido ao sistema de sprays de água e pressão que se responsabiliza pela formação da água amoniacal.

Diante ao atual cenário mundial, é estratégico e necessário retomar e intensificar a produção nacional de fertilizantes, de forma competitiva, a partir de novas tecnologias que diminuam os impactos ambientais e a dependencia externa, aumentando a competitividade no mercado com preços mais estáveis garantindo a segurança alimentar.

Mediante ao exposto, este estudo teve como objetivo geral desenvolver um processo simples e operacionalmente prático para recuperar a  $\text{NH}_3$  gerada em sistemas agroindustriais, com vistas no seu reuso como matéria-prima para a indústria de fertilizantes. Neste contexto, foram objetivos específicos: i) avaliar o processo para a recuperação de amônia ( $\text{NH}_3$ ), ii) desenvolver protótipo para aplicação do processo na recuperação de  $\text{NH}_3$  de cama de aviário e iii) elaborar estudo de viabilidade técnica e econômica para a aplicação e implantação do processo.

**2 CAPÍTULO I - DESENVOLVIMENTO DE PROCESSO E DE  
PROTÓTIPO PARA RECUPERAÇÃO DE AMÔNIA  
LIBERADA DE CAMA DE AVIÁRIO**

## 2.1 RESUMO

A principal fragilidade do mercado de mercado nacional de fertilizantes é a elevada dependência das importações. Uma alternativa, para reduzir a dependência seria a recuperação da  $\text{NH}_3$  residual em sistemas industriais e agroindustriais. Neste contexto, o objetivo deste capítulo foi desenvolver um processo simples para recuperar  $\text{NH}_3$  originada da cama de frango por meio da neutralização com ácidos. Para tanto, foram realizados dois experimentos, sendo que no primeiro experimento desenvolveu-se sistema para produzir  $\text{NH}_3$  (amônia) pela destilação de  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  (sulfato de amônio) com intuito de definir as concentrações das soluções de  $\text{H}_3\text{PO}_4$  (ácido fosfórico),  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (ácido sulfúrico) e mistura de  $\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$  que variaram de 4,0 a 14,38 mol  $\text{L}^{-1}$ . A  $\text{NH}_3$  produzida foi carregada por fluxo contínuo de ar e borbulhada em recipiente contendo os ácidos. As soluções amonizadas foram secas a 70°C e os sais cristalizados foram caracterizados quanto ao pH, teores de N, P, S e composição mineralógica. As concentrações de 9,0 mol  $\text{L}^{-1}$  de  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ; 9,6 mol  $\text{L}^{-1}$  de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  e 9,0 mol  $\text{L}^{-1}$  de  $\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$  apresentaram maior viabilidade no processo de amonização com máxima captura de N- $\text{NH}_3$ . O pH e os teores de N, P e S foram similares aos reagentes analíticos de referência,  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$  (fosfato monoamônio),  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$  (fosfato diamônio), e  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  sugerindo a formação dos sais. Adicionalmente os difratogramas de raios-X dos sais sintetizados quando comparado aos reagentes analíticos de  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ , e  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  confirmaram a formação dessas espécies devida a amonização ácida. Os teores de N, P S e o difratograma de raios-X da mistura de  $\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$ , indicaram a síntese de um sal composto pela mistura de  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ , e  $\text{NH}_4\text{SO}_4$ . Entretanto, não foi descartada a hipótese da síntese de um novo sal diamônio fosfato sulfato (DAFS), triamônio fosfato sulfato (T3AFS) ou tetramônio fosfato sulfato (T4AFS). No segundo experimento desenvolveu-se um protótipo composto por bomba de ar, dois reatores de amonificação, condensadores e reatores de amonização, para compor as etapas do processo de recuperação da amônia liberada. Utilizou-se como fonte de  $\text{NH}_3$  a cama de aviário, obtida de galpões do sistema dark house acondicionada em reator de amonificação. A  $\text{NH}_3$  foi carregada por fluxo contínuo de ar e borbulhada em recipientes contendo as soluções de 9,0 mol  $\text{L}^{-1}$  de  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ; 9,6 mol  $\text{L}^{-1}$  de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ; 1,19 mol  $\text{L}^{-1}$  de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ b (ácido sulfúrico biogênico, obtido pela oxidação de enxofre elementar por *Acidithiobacillus thiooxidans*); 9,0 mol  $\text{L}^{-1}$   $\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$ ; 2,38 mol  $\text{L}^{-1}$  de  $\text{H}_3\text{PO}_4 + 1,19$  mol  $\text{L}^{-1}$  de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ b e 4,0 mol  $\text{L}^{-1}$  de  $\text{HNO}_3$ . As soluções amonizadas foram secas a 70°C e os sais cristalizados foram caracterizados quanto ao pH, teores de N, P e S composição das fases cristalinas. O protótipo desenvolvido apresentou eficiência de amonização dos ácidos

de 93 a 100%, demonstrando, portanto, potencial aptidão para uso de resíduo sólido de agroindústrias e resíduo líquido de indústrias. O pH e os teores de N, P e S dos sais sintetizados foram similares aos reagentes analíticos de referência, sugerindo a formação dos sais de  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ . Os difratogramas de raios X dos sais sintetizados quando comparados aos reagentes analíticos de  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ , e  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  confirmaram a formação dessas espécies químicas. Os teores de N, P, S e difratogramas de raios X da mistura de  $\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$ , confirmaram a síntese de um sal composto pela mistura de  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ , e  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ , e novamente, sugere fortemente que a hipótese da síntese dos sais diamônio fosfato sulfato (DAFS), triamônio fosfato sulfato (T3AFS) ou tetramônio fosfato sulfato (T4AFS) é verdadeira.

Palavras-chave: Recuperação. Amônia. Fertilizantes.

## 2.2 ABSTRACT

The main weakness of the national fertilizer market is the high dependence on imports. An alternative to reduce dependence would be the recovery of residual  $\text{NH}_3$  in industrial and agro-industrial systems. In this context, the objective of this chapter was to develop a simple process to recover  $\text{NH}_3$  originating from chicken litter through neutralization with acids. To this end, two experiments were carried out, and in the first experiment a system was developed to produce  $\text{NH}_3$  (ammonia) through the distillation of  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  (ammonium sulfate) with the aim of defining the concentrations of  $\text{H}_3\text{PO}_4$  (phosphoric acid) solutions,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (sulfuric acid) and a mixture of  $\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$  that ranged from 4.0 to 14.38 mol L<sup>-1</sup>. The  $\text{NH}_3$  produced was carried by a continuous flow of air and bubbled into a container containing the acids. The ammoniated solutions were dried at 70°C and the crystallized salts were characterized regarding pH, N, P, S content and mineralogical composition. Concentrations of 9.0 mol L<sup>-1</sup> of  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ; 9.6 mol L<sup>-1</sup> of  $\text{H}_2\text{SO}_4$  and 9.0 mol L<sup>-1</sup> of  $\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$  showed greater viability in the ammoniation process with maximum capture of N- $\text{NH}_3$ . The pH and N, P and S contents were similar to the reference analytical reagents,  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$  (monammonium phosphate),  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$  (diammonium phosphate), and  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ , suggesting the formation of salts. Additionally, the X-ray diffractograms of the synthesized salts when compared to the analytical reagents of  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ , and  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  confirmed the formation of these species due to acid ammonization. The N, P S contents and the X-ray diffractogram of the mixture of  $\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$  indicated the synthesis of a salt composed of a mixture of  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ , and  $\text{NH}_4\text{SO}_4$ . However, the hypothesis of the synthesis of a new diammonium phosphate sulfate salt (DAFS), triammonium phosphate sulfate (T3AFS) or tetrammonium phosphate sulfate (T4AFS) was not ruled out. In the second experiment, a prototype was developed consisting of an air pump, two ammonia reactors, condensers and ammonia reactors, to compose the stages of the recovery process of the released ammonia. Poultry litter was used as a source of  $\text{NH}_3$ , obtained from dark house system sheds stored in an ammonification reactor. The  $\text{NH}_3$  was carried by a continuous air flow and bubbled into containers containing solutions of 9.0 mol L<sup>-1</sup> of  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ; 9.6 mol L<sup>-1</sup> of  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ; 1.19 mol L<sup>-1</sup> of  $\text{H}_2\text{SO}_4\text{b}$  (biogenic sulfuric acid, obtained by the oxidation of elemental sulfur by *Acidithiobacillus thiooxidans*); 9.0 mol L<sup>-1</sup>  $\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$ ; 2.38 mol L<sup>-1</sup> of  $\text{H}_3\text{PO}_4 + 1.19$  mol L<sup>-1</sup> of  $\text{H}_2\text{SO}_4\text{b}$  and 4.0 mol L<sup>-1</sup> of  $\text{HNO}_3$ . The ammoniated solutions were dried at 70°C and the crystallized salts were characterized in terms of pH, N, P and S content and composition of the crystalline phases. The prototype developed showed an acid ammoniation efficiency of 93 to 100%, therefore demonstrating

potential suitability for use with solid waste from agro-industries and liquid waste from industries. The pH and N, P and S contents of the synthesized salts were similar to the reference analytical reagents, suggesting the formation of  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ,  $\text{NH}_4\text{SO}_4$ ,  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  salts. The X-ray diffractograms of the synthesized salts when compared to the analytical reagents of  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ , and  $\text{NH}_4\text{SO}_4$  confirmed the formation of these chemical species. The N, P, S contents and X-ray diffractograms of the mixture of  $\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$  confirmed the synthesis of a salt composed of the mixture of  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ , and  $\text{NH}_4\text{SO}_4$ , and again, strongly suggests that the hypothesis of the synthesis of the salts diammonium phosphate sulfate (DAFS), triammonium phosphate sulfate (T3AFS) or tetrammonium phosphate sulfate (T4AFS) is true.

Keywords: Recovery. Ammonia. Fertilizers.

### 2.3 INTRODUÇÃO

O aumento da população humana, o qual teve um incremento de 5,0 bilhões de pessoas em 62 anos (1960 - 2022) exigiu uma expansão na produção agrícola em áreas com solos de limitada fertilidade e um incremento da produtividade, promovendo maior demanda de fertilizantes. Felizmente, a partir do desenvolvimento do processo de síntese da amônia em 1909 intensificou-se a produção mundial de fertilizantes. O consumo de fertilizantes em 2020 na China, Índia, Estados Unidos e Brasil correspondeu a 58 % do consumo mundial, sendo que a China foi responsável por 24 % do consumo global de N, P e K.

O mercado mundial de fertilizante, assim como o de outras commodities, é afetado por vários fatores que alteram a ordem econômica mundial. Em 2019, por exemplo, devido à pandemia Covid-19, os países detentores das grandes matrizes produtoras de fertilizantes, restringiram o fluxo de exportação, com intuito de garantir o abastecimento local. A dependência destes mercados por outros países, como o Brasil, compromete a produção agrícola e gera a insegurança alimentar e econômica.

A procura por novos materiais fertilizantes, insumos de origem biológica, manejo e inovação tecnológica vem crescendo, a fim de reduzir a dependência do mercado externo e garantir a produtividade. No Brasil foi implementado em 2022 o plano nacional de fertilizantes (PNF) definindo-se diretrizes, objetivos, metas e ações para garantir a obtenção e intensificação da produção de fertilizantes no âmbito nacional. Dentre os objetivos encontra-se a diminuição das perdas gasosas de nitrogênio em pelo menos 50 % até 2025 e em 70 e 90 % até 2040 e 2050, respectivamente (Brasil, 2021).

Alguns trabalhos buscaram desenvolver métodos de captura de  $\text{NH}_3$  em sistemas agroindustriais. Os métodos empregados são a partir da captura por soluções ácidas (Wood e Van Heyst, 2016), biofiltros *in natura*, biofiltros ozonizados ou oxidados (Oviedo-Rondón, 2008; Wang et al. 2010; Akdeniz e Janni, 2012; Showqi et al. 2016).

Os sistemas purificadores com uso de soluções ácidas são instalados nos exaustores por onde ocorre a saída dos gases e partículas. O processo ocorre borrifando uma solução ácida de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  em contracorrente de ar, que reagirá com o gás  $\text{NH}_3$  (Manuzon et al. 2007; Wood e Van Heyst, 2016). Entretanto uma de suas limitações é a obstrução dos bicos de aspersão pelas partículas finas que saem no fluxo de ar, necessitando de manutenção frequente (Ullman et al. 2004). Esse mesmo sistema foi testado, em uma compostagem de excreções de aves, constatando reduções de  $76 \pm 11$  % no fluxo de  $\text{NH}_3$  para correntes de ar com concentrações médias de  $92 \pm 49 \text{ mg.dm}^{-3}$  (Hadlocon et al. 2015).

Os biofiltros consistem em materiais que apresentam capacidade de capturar gases dispersos na atmosfera. Eles variam conforme sua composição podendo ser, carvão ativado, aparas de madeira, casca de madeira, fibra de coco, turfa, carvão ativado granulado, perlita e poliestireno (Chen e Hoff, 2009). Além disso, podem ser classificados como biofiltros horizontais e verticais (Showqi et al., 2016), sendo o último (vertical) mais utilizado na saída de exaustores (Akdeniz e Janni, 2012). O material do biofiltro deve ser mantido de 40 a 80 % de umidade, com o pH entre 7 e 8. Sheridan et al., (2002), avaliando a biofiltração na produção de suínos utilizando cascas de madeira, em três períodos experimentais, constataram a remoção de 73, 85 e 87 % da  $\text{NH}_3$ . Kafle et al. (2014) relataram uma eficiência de remoção de  $\text{NH}_3$  superior a 95% ( $\cong 11\text{mg/kg}$ ) utilizando biofiltro a base de casca de madeira com 64 a 65 % de umidade, também em suinocultura

Asada et al. (2002) verificaram que 0,5 g do biofiltros de biochar de bambú pirolizado a  $500^\circ\text{C}$  reduziu a concentração de  $\text{NH}_3$  de 100 para  $5\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$  em um prazo de 3 h. Taghizadeh-Tossi et al. (2012) quantificaram retenção  $8,7\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$  de N- $\text{NH}_3$  em biochar de casca de *Pinus radiata* pirolisada a  $300^\circ\text{C}$ , o autor ressalta que a intensidade de captura da  $\text{NH}_3$  depende da biomassa utilizada, das condições da pirólise para produzir o biochar.

Além da temperatura de carbonização, o uso de substâncias ácidas promove aumento na capacidade de adsorção de  $\text{NH}_3$ . Paiva et al. (2019) trabalhando com carvão vegetal (CV) de *Eucalyptus grandis*, verificou que quando não oxidado por  $\text{HNO}_3$ , o CV adsorveu  $6,17\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$  de N- $\text{NH}_3$ , entretanto, quando oxidado em soluções com concentrações variando de  $0,5 - 8,5\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , por períodos variando entre 0,5 e 7,5 h, foram constatadas quantidades adsorvidas entre  $5,53 - 55,87\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$  de N- $\text{NH}_3$ . Segundo esses autores, esta capacidade do CV foi atribuída a oclusão da  $\text{NH}_3$  nos poros e a protonação da  $\text{NH}_3$  formando  $\text{NH}_4^+$  seguida de sua adsorção. Uma alternativa é a ozonização para promover a funcionalização. Quanto maior a oxidação do carbono e o número de grupos ácidos na superfície do carbono, especialmente os grupos carboxílicos, maior a eficiência na remoção de amônia (Valdés et al. 2002; Park e Jin, 2005).

Outros métodos empregados na recuperação da amônia foram aplicados aos sistemas industriais de siderurgia a coque. A  $\text{NH}_3$  é um subproduto da coqueificação, sendo um dos constituintes do gás de coqueria (COG). A fração de amônia volatilizada do resíduo pode ser recuperada por meio de três processos conhecidos como processo de sulfato de amônio, processo Phosam e processo de lavagem com água (Garcia et al. 2013; Santos, 2020).

No processo de sulfato de amônio a amônia é recuperada por meio de uma solução de sulfato de amônio e ácido sulfúrico. Durante o processo há a formação de cristais de sulfato de amônio que posteriormente são centrifugados lavados e secos. O processo não é muito utilizado

na coqueria devido ao custo de produção, o valor do ácido sulfúrico é mais alto que o valor de venda do sal formado ao final, isso se deve às impurezas orgânicas e inorgânicas presentes no sal que afetam a forma e o tamanho do cristal obtido (Santos, 2020).

O processo Phosam foi desenvolvido para produzir amônia anidra comercialmente pura a partir dos gases da coqueria. A amônia é recuperada em um recipiente de absorção por pulverização de uma solução mista de fosfato de amônio, fosfato diamônio e fosfato triamônio. A solução passa por processo de extração a vapor em alta temperatura e pressão que libera amônia, a qual é conduzida para uma coluna de fracionamento onde se obtém a amônia anidra (Garcia et al. 2013; Santos, 2020).

O processo de lavagem de água é mais simples e um dos mais utilizados, consistindo da aspersão de água contra a corrente do fluxo dos gases gerados da coqueria. A solução rica em amônia e outros compostos é então direcionada a colunas de destilação, a amônia é removida e coletada para tratamento biológico.

Em função da demanda de fertilizantes nitrogenados e da onerosidade ambiental e financeira dos processos de recuperação empregados atualmente, teve por objetivos neste capítulo: i) avaliar processo para a recuperação de  $\text{NH}_3$  e ii) desenvolver protótipo para a aplicação do processo na recuperação de  $\text{NH}_3$  da cama de aviário.

## 2.4 MATERIAL E MÉTODOS

O desenvolvimento do processo de captura da amônia foi composto por dois experimentos. O primeiro experimento foi realizado com reagentes analíticos simulando geração de  $\text{NH}_3$  e a sua captura por soluções ácidas com diferentes concentrações e combinações de ácidos. No segundo experimento desenvolveu-se um protótipo para utilizar a cama de aviário com fonte de  $\text{NH}_3$  e a sua captura em soluções ácidas. Os experimentos foram realizados nos laboratórios de Fertilidade do Solo e de Fertilizantes do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa no período janeiro de 2020 à dezembro 2021.

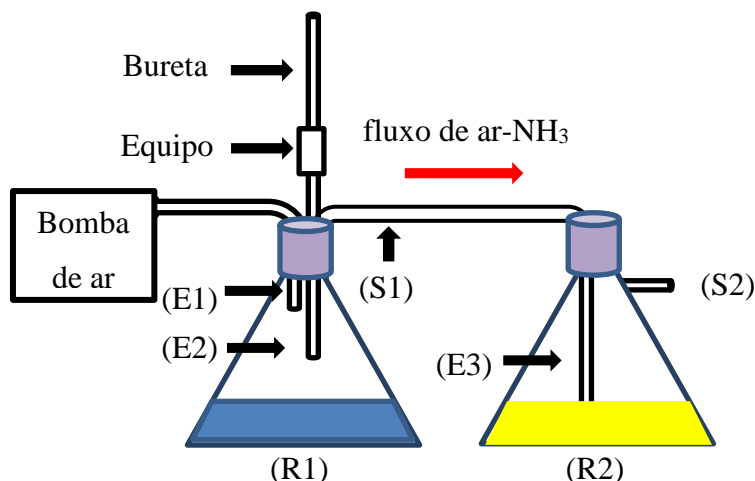
### 2.4.1 Experimento 1. Simulação de produção e captura de amônia

#### 2.4.1.1 Sistema de amonificação e amonização<sup>1</sup>

O sistema foi composto por um reator de amonificação (R1) e um reator de amonização de ácidos (R2), constituídos de um frasco Erlenmeyer de 2 L e um kitasato de 0,5L, respectivamente (Figura 1), ambos fechados com rolhas de borracha. O R1 continha solução alcalina (NaOH) para condicionar um ambiente alcalino e o R2 as soluções ácidas receptoras da  $\text{NH}_3$ . Ao R1 foi conectada uma bureta de 50 mL acoplada a um equipo macrogotas (E2) para adição de solução de  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  como fonte primária de amônia. Ao R1 acoplou-se uma bomba de ar (E1) com capacidade de vazão de até  $125 \text{ L h}^{-1}$  para propiciar o fluxo de ar carreador de  $\text{NH}_3$  (ar- $\text{NH}_3$ ) do R1 para o R2. Os reatores R1 e R2 foram conectados por magueira de silicone de 5 mm de diâmetro (S1), sendo que em R2, ao final do S1 foi conectado um tubo plástico (poli tereftalato de etila) de 0,5 mm de diâmetro (E3) cuja ponta ficou imersa na solução ácida para proporcionar o borbulhamento do ar- $\text{NH}_3$ . A saída lateral do kitasato (S2) permitiu o fluxo contínuo de ar sem aumento da pressão interna do sistema.

---

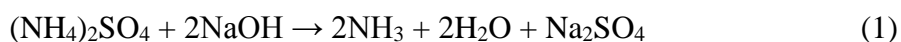
<sup>1</sup> O termo “amonificação” que define a produção de amônia a partir de uma determinada fonte, foi tomado emprestado do ciclo do N, onde caracteriza a produção de amônia em uma das etapas do processo de mineralização de formas orgânicas de N. O termo “amonização” que indica o “ato ou efeito de adicionar amônia ou amoníaco a restos de cultivos ou forragens muito fibrosas para melhorar sua qualidade nutricional na alimentação de bovinos” foi tomado emprestado para definir o processo de enriquecimento dos ácidos receptores com amônio



**Figura 1.** Representação esquemática do sistema de amonificação e amonização de ácidos. E1: entrada de ar, E2: entrada da fonte de  $\text{NH}_3$ , E3: entrada de ar- $\text{NH}_3$ , R1: reator de amonificação, R2: reator de amonização, S1: saída de ar- $\text{NH}_3$  e conexão dos reatores (mangueira de 0,5 mm de diâmetro), S2:saída de ar.

#### 2.4.1.2 Processo de amonificação e amonização

A amonificação se deu a partir de solução de  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  gotejada no reator R1 contendo solução de  $\text{NaOH}$ , conforme a reação 1. A amonização ocorreu no reator R2 pela captura da amônia por soluções de  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , ou  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ou a mistura de ambas, de acordo com as reações químicas 2 a 8 (Tabela 1). Todas as soluções foram preparadas por meio de reagentes analíticos e água deionizada.



A geração de amônia no reator R1 foi estimada em excesso para não limitar o equilíbrio estequiométrico com o  $\text{H}_3\text{PO}_4$  ou  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ou a combinação desses ácidos na relação molar 1:1, para a formação de  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  conforme as reações 2 a 4 ou os sais hipotéticos  $(\text{NH}_4)_x\text{H}_y\text{PO}_4\text{H}_z\text{SO}_4$  conforme as reações 5 a 8 (Tabela 1). As reações químicas de 5 a 8 foram simuladas a partir do site “[www.chemicalaid.com](http://www.chemicalaid.com)” em função da variação das quantidades molares de amônia os ácidos  $\text{H}_3\text{PO}_4$  ou  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .

**Tabela 1.** Reações químicas de amonização do  $\text{H}_3\text{PO}_4$  e  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , isoladamente ou combinados, com a massas molecular ( $mM$ ) e os teores e as relações de massa de N, P e S dos sais produtos

Nº	Reação	$mM$	N	P	S	N/P	N/S	N/P+S
		$\text{g mol}^{-1}$	g/kg					
2	$\text{NH}_3 + \text{H}_3\text{PO}_4 \rightarrow \text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ (MAP)	115,03	121,70	269,20	-	0,45		
3	$2\text{NH}_3 + \text{H}_3\text{PO}_4 \rightarrow (\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ (DAP)	132,06	212,10	234,50	-	0,9		
4	$2\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (SA)	132,14	211,90	-	242,60		0,87	
5	$\text{NH}_3 + \text{H}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{NH}_4\text{H}_3\text{PO}_4\text{HSO}_4^*$	213,10	65,70	145,30	150,40			0,22
6	$2\text{NH}_3 + \text{H}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow (\text{NH}_4)_2\text{H}_3\text{PO}_4\text{SO}_4^*$	230,13	121,70	134,50	139,30			0,44
7	$3\text{NH}_3 + \text{H}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow (\text{NH}_4)_3\text{H}_2\text{PO}_4\text{SO}_4^*$	247,16	170,00	125,30	129,70			0,66
8	$4\text{NH}_3 + \text{H}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow (\text{NH}_4)_4\text{HPO}_4\text{SO}_4^*$	264,19	212,00	117,20	121,30			0,88

\*Produtos hipotéticos

Ao reator R1, contendo cerca de 300 a 600 mL da solução  $10 \text{ mol L}^{-1}$  de NaOH, foram adicionados de 300 a 600 mL da solução  $1,0$  a  $2,5 \text{ mol L}^{-1}$  de  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ , com frequência de gotejo regulado pelo equipo macrogotas de forma que permitiu o completo escoamento do volume em 15 min. A solução no R1 foi agitada a 30 rpm constantemente com agitador magnético.

Com o início do gotejamento da solução de  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  a bomba de ar foi acionada para estabelecer o fluxo de ar- $\text{NH}_3$  do reator R1 para o R2, onde foi borbulhado nas soluções ácidas receptoras, promovendo a amonização.

A evolução da reação de amonização foi monitorada pela elevação do pH, medidos a intervalos variando entre 15 e 60 min. Para auxiliar o monitoramento da elevação do pH, adicionaram-se às soluções ácidas 10 gotas do indicador de verde de bromocresol que apresenta cor amarela em  $\text{pH} < 3,8$ , verde em  $\text{pH}$  entre  $3,8 - 4,8$  e azul em  $\text{pH} > 4,8$ . Como valores de referência, adotaram-se os valores de pH de soluções  $1 \text{ mol L}^{-1}$  de  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$  ( $\text{pH} 4,0$ ),  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$  ( $\text{pH} 8,0$ ) e  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  ( $\text{pH} 5,0$ ).

#### 2.4.1.3 Ensaio de amonização dos ácidos

O ensaio foi conduzido para definir as concentrações das soluções ácidas que otimizassem a amonização de acordo com as reações 2 a 8 (Tabela 1) ou seja, definir o máximo de  $\text{NH}_3$  que poderia ser capturado nas diferentes soluções ácidas. Para isso trabalhou-se com 250 mL das soluções nas concentrações variando, arbitrariamente, entre 2 e  $14,83 \text{ mol L}^{-1}$ , preparadas

a partir de  $\text{H}_3\text{PO}_4$  (85 % de pureza e densidade  $1,71 \text{ kg.L}^{-1}$ ) e de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (98 % de pureza e densidade  $1,84 \text{ kg.L}^{-1}$ ), que se apresentam na tabela 2.

**Tabela 2.** Concentrações das soluções de ácido fosfórico, ácido sulfúrico e a mistura desses ácidos na relação molar 1:1.

Soluções	$\text{H}_3\text{PO}_4$	$\text{H}_2\text{SO}_4$
Nº	————mol/L————	
1	4,0	-
2	6,0	-
3	8,0	-
4	9,0	-
5	9,2	-
6	10,0	-
7	12,0	-
8	14,83 <sup>1</sup>	-
9 <sup>2</sup>	4,0	-
10 <sup>2</sup>	6,0	-
11	-	4,0
12	-	6,0
13	-	8,0
14	-	9,6
15	-	10,0
16	2,0	2,0
17	3,0	3,0
18	4,0	4,0
19	4,5	4,5
20	5,0	5,0

<sup>1</sup> Reagente  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ; <sup>2</sup> Avaliação da síntese de  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$

Os finais das reações de amonização das soluções de 1 a 4 (Tabela 2), com a possível síntese de  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$  foram sinalizados pela mudança da cor da solução de amarelo para verde, indicando  $\text{pH} \geq 4,0$ . Interrompeu-se o fluxo de ar- $\text{NH}_3$ , anotou-se o tempo decorrido até este momento e mediu-se o pH das soluções. Para as soluções 9 e 10 (Tabela 2), com possível síntese de  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ , a partir do momento em que as soluções mudaram de verde para azul ( $\text{pH} \geq 4,8$ ), o pH foi medido com maior regularidade a intervalos de 15 min até que atingissem o pH 8,0, que é o pH da solução  $1 \text{ mol L}^{-1}$  de  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$  tomada como referência. Quando as soluções 11 a 14, com expectativa de síntese de  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  atingiram a cor azul, ( $\text{pH} \geq 4,8$ ), que é próximo ao pH da solução de  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$   $1 \text{ mol L}^{-1}$ , interrompeu-se o fluxo de ar- $\text{NH}_3$ . Anotou-se o tempo de reação e mediu-se o pH.

Para as soluções 16 a 20, com expectativa de síntese dos sais  $(\text{NH}_4)_x\text{H}_y\text{PO}_4\text{H}_z\text{SO}_4$  adotou-se como indicador do final das reações a percepção do odor de  $\text{NH}_3$  no fluxo de ar

expelido pela saída S2 do reator de amonização. Nestas circunstâncias, anotou-se o tempo de reação, o fluxo de ar-NH<sub>3</sub> foi interrompido e as soluções foram mantidas no reator R2, aberto, até não mais perceber o odor de NH<sub>3</sub>, quando então foi medido o pH.

#### 2.4.1.4 Obtenção dos sais sintetizados

Ao final do processo as soluções ácidas amonizadas foram transferidas para recipientes de vidro e secas em estufa a 70°C, até peso constante. Os recipientes contendo os sais cristalizados foram resfriados por 30 min em dessecador e em seguida os sais foram pesados e, depois, armazenados em recipientes fechados.

A eficiência da amonização (EA) foi estimada, relacionando a massa dos sais sintetizados em relação a massa molecular dos sais, de acordo com as reações (Tabela 1), conforme a equação abaixo:

$$EA (\%) = \frac{MR \times 4}{mM \times Mps} \times 100$$

onde, MR: massa real do sal sintetizado (g) na amonização de 250 mL de solução ácida; 4: fator de conversão para g.L<sup>-1</sup>; mM: massa molecular esperada de acordo com a estequiometria da reação de amonização (g mol<sup>-1</sup>); Mps: mols de produto sintetizado esperado.

#### 2.4.1.5 Caracterização química e físico-química dos sais

A caracterização química dos sais foi realizada de acordo com procedimentos para fertilizantes de acordo com o MAPA (2014), com adaptações nos métodos de dosagem para P e S.

Para as análises químicas os sais foram secos em estufa a 50°C por 24h. Para análise de nitrogênio pesou-se 0,010 ± 0,001g de amostra dos sais e adicionou em tubos de destilação com posterior adição de 7 mL de água deionizada e homogeneização em aparelho agitador de tubos vortex. As amostras foram submetidas à destilação em destilador micro-Kjedahl, adicionando-se 10 mL de NaOH 10 mol L<sup>-1</sup>. A NH<sub>3</sub> liberada foi coletada em solução indicadora mista de ácido bórico 2% com verde de bromocresol e vermelho de metila. A solução resultante foi titulada com HCl 0,1 mol L<sup>-1</sup>. O mesmo procedimento foi adotado para uma prova em branco, sem a adição dos sais. Os teores de N foram obtidos pela fórmula:

$$N(g\ kg^{-1}\ N - NH_3) = \frac{(Vol. HCl - Vol. HCl\ br) * [HCl] * 14}{P}$$

onde: Vol. HCl: volume (mL) gasto de HCl; Vol. HClbr : volume (mL) gasto de HCl do branco; [HCl]: concentração HCl; 14: massa atômica do nitrogênio; P: massa da amostra.

Para a determinação de fósforo (P) e enxofre (S) pesou-se  $0,5 \pm 0,1$ g das amostras e transferiu para recipientes de vidro de 100 mL. Adicionaram-se 25 mL de solução de citrato neutro de amônio (CNA) e levou a chapa aquecedora até a ebulição, permanecendo por um período total de 3 horas. Após este período os recipientes foram mantidos em repouso até atingir temperatura ambiente e, em seguida, os extratos foram filtrados em papel filtro de porosidade média e transferidos para balão de 200 mL, com lavagens sucessivas utilizando-se pequenos volumes de água deionizada. Completou-se o volume do balão com posterior homogeneização, em seguida reservou-se um volume de 50 mL para dosagem por espectrometria de emissão ótica por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES).

Foi medido o pH das soluções equivalente a  $1 \text{ mol L}^{-1}$  dos sais formados tendo por referência as massas moleculares indicadas na Tabela 1, seguido de homogeneização por 10 min com posterior determinação do pH. em pHmetro digital.

#### **2.4.1.6 Cristalografia dos sais quanto às fases cristalinas (difratometria de raios-X)**

As amostras dos sais foram secas por 24 h a  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  em estufa e, em seguida, foram maceradas em almofariz de ágata. Igual procedimento foi aplicado para amostras dos reagentes analíticos  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$  e  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$  VETEC<sup>®</sup> e da  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  FMAIA<sup>®</sup> e para a mistura  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4 + (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  na relação molar 1:1.

As amostras foram dispersas em lâminas de vidro escavadas (não orientadas; método do pó). As análises foram realizadas em difratômetro Panalytical X'PERT PRO PW 3040/60, equipado com tubo de cobalto ( $\lambda = 1,79026$ ) e filtro de Fe, operando a 40 kV e 30 mA. As varreduras foram realizadas passo a passo na faixa de 4 a  $60 \text{ }^\circ 2\theta$  com  $0,05 \text{ }^\circ 2\theta$  de incremento e tempo de contagem de 3 s em cada etapa.

#### **2.4.2 Experimento 2. Captura de amônia a partir da cama de aviário**

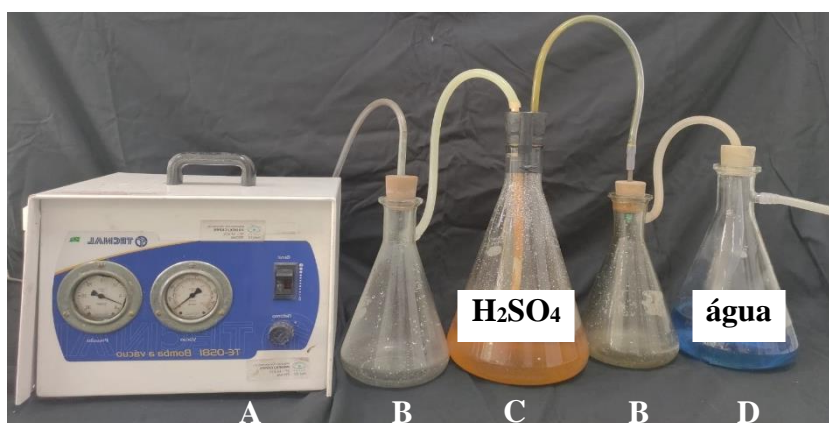
Este experimento foi realizado a partir das observações e conclusões do Experimento 1 – Simulação da captura de amônia. O experimento foi dividido em duas etapas: na primeira, foi desenvolvido um protótipo para avaliar a amonificação a partir da cama de frango e a amonização das soluções ácidas. O desenvolvimento do protótipo, que consistiu da sua estruturação e de testes operacionais se estendeu por 47 d entre fevereiro e abril de 2021. Na segunda etapa, que correspondeu ao experimento propriamente dito, utilizou-se o protótipo para

avaliar o processo de amonificação-amonização utilizando-se cama de frango como fonte de  $\text{NH}_3$ , por um período de 15 dias em agosto 2021.

#### 2.4.2.1 Desenvolvimento de protótipo para amonificação-amonização

O protótipo de amonificação-amonização foi composto por uma bomba de ar, um conjunto purificador/umidificador de ar, controladores de refluxo (B), reatores de amonificação (R1 e R2), sistema desumidificador, duto principal, dutos secundários e reatores de amonização.

Utilizou-se uma bomba TECNAL modelo TE-0581 com vazão  $25 \text{ L min}^{-1}$  (Figura 2 A). No conjunto purificador/umidificador, o purificador consistiu em um Erlenmeyer de 4 L contendo cerca de 2 L de ácido sulfúrico  $0,1 \text{ mol L}^{-1}$  (C) e o umidificador era um kitasato de 2 litros (D) contendo cerca de 1 L de água. Dois kitasatos de 1L (B) foram utilizados como controladores de refluxo.



**Figura 2.** Bomba para produção de ar (A), controlador de refluxo (B), purificador (C) e umidificador (D).

Os reatores de amonificação consistiram em dois recipientes de polietileno de alta densidade com tampa rosqueável e com capacidade de 80 L (Figura 3). Para evitar vazamento do ar de amônia<sup>2</sup> ( $\text{ar-NH}_3$ ) as vedações das tampas foram reforçadas utilizando massa de calafetar (A). Nas tampas dos reatores havia duas conexões para mangueiras: uma para a entrada (B) e outra para a saída (C) do fluxo de ar.



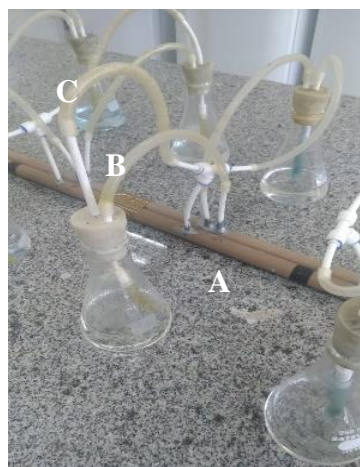
**Figura 3.** Recipientes polietileno de alta densidade que constituíram o reator de amonificação (A), entrada de ar (B), e saída do ar-NH<sub>3</sub> dos reatores (C).

O sistema desumidificador (Figura 4) foi composto pelas câmaras de resfriamento e de condensação. A câmara de resfriamento consistiu em uma bandeja plástica de 20 L (A) na qual se acomodou 2,0 m de mangueira de 20 mm de diâmetro enrolada (B) e foi mantida com cerca de 20 L de água continuamente resfriada por meio de bolsas de gelo. A câmara de condensação consistiu em caixa de isopor de 15 L (C) contendo um galão de polietileno de 10 L (D).



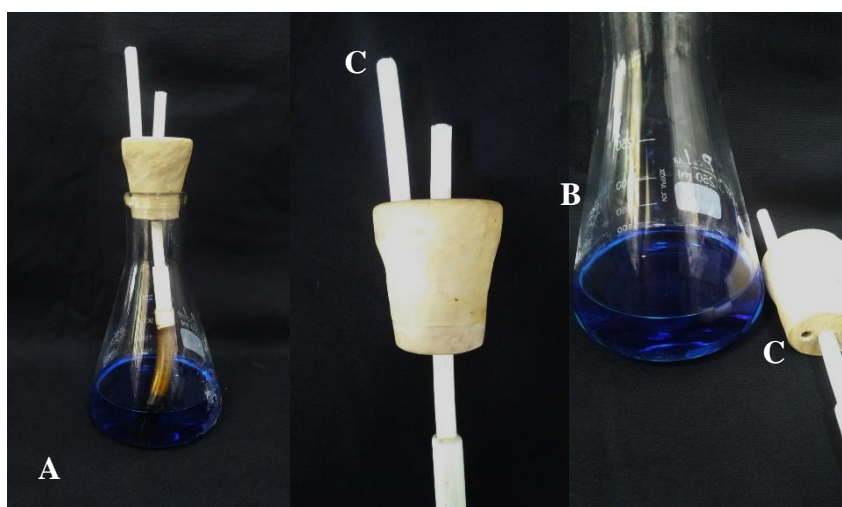
**Figura 4.** Sistema desumidificador composto por: câmara de resfriamento (A) com detalhe do interior com mangueira enrolada e bolsas de gelo imersos em água (B), câmara de condensação (C) com detalhe do recipiente de coleta da água condensada (D).

O duto principal (A) foi constituído por tubo de PVC de 12,70 mm de diâmetro e os dutos secundários (C) por mangueiras de polipropileno e de silicone com 3,00 a 6,35 mm de diâmetros (Figura 5).



**Figura 5.** Duto principal (A), reator de amonização (B), duto secundário de distribuição de gases para os reatores (C), duto de exaustão de gases (D).

Os reatores de amonização foram frascos Erlenmeyers de 250 mL (RA) fechados com rolhas de borracha com tubo para entrada do ar-NH<sub>3</sub> e de tubo de saída do ar livre de NH<sub>3</sub> e despressurização do reator (Figura 6).



**Figura 6.** Reator de amonização (A) com detalhes das conexões para entrada do ar-NH<sub>3</sub> (B) e saída de ar e despressurização (C).

#### 2.4.2.2 Ajustes do protótipo de amonificação-amonização

Para os testes de ajustes, utilizou-se cama de frango de quarto ciclo de uso, obtida em aviário com produção em sistema *dark-house*, com a densidade de 12 frangos/m<sup>2</sup>. O volume de cama foi homogeneizado e destorroado manualmente. Utilizando-se quatro subamostras determinou-se, gravimetricamente, com secagem a 102 °C que a umidade da cama era equivalente a 231,1 g kg<sup>-1</sup> de água. Outras subamostras foram secas em estufa a 65 °C até peso constante e foram analisadas em analisador elementar CHNS (Perk Elmer modelo Series II

2400), constatando teores de 373,3 e 30,9 g.kg<sup>-1</sup> de C e N, respectivamente, portanto, com C/N igual a 12/1.

Uma massa de 25 kg de cama de aviário foi adicionada ao reator de amonificação (RC1), ao qual adicionou-se água suficiente para elevar a umidade da cama para o equivalente a 600 g kg<sup>-1</sup> de cama. Após o fechamento do reator de amonificação, estabeleceu-se o fluxo de ar com o acionamento da bomba. O período de teste do protótipo se estendeu por 47 dias.

Para o teste do protótipo foram instalados reatores de amonização para avaliar a amonização de 100 mL das soluções de 9 mol L<sup>-1</sup> de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, 9,6 mol L<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e misturas com 4,5 mol L<sup>-1</sup> de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (soluções nº 4, 14 e 19 respectivamente, Tabela 2). Para monitorar a elevação do pH adicionaram-se às soluções ácidas 10 gotas do indicador de verde de bromocresol que apresenta cor amarela em pH < 3,8, verde em pH entre 3,8 – 4,8 e azul em pH > 4,8. Como valores de referência para finalizar o processo de amonização, adotaram-se os valores de pH de soluções 1 mol L<sup>-1</sup> de NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> (pH 4,0), (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> (pH 8,0) e (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (pH 5,0). Para a reação nº 8 considerou-se o pH 7,8, que foi o pH da mistura de 0,5 mol de (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> e (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, respectivamente. Para cada solução foram utilizados três reatores de amonização (repetições), distribuídos de forma aleatória ao longo do duto principal de condução do fluxo de ar-NH<sub>3</sub>.

O teor de NH<sub>3</sub> no fluxo de ar-NH<sub>3</sub> foi monitorado em dois pontos do duto principal: um no início, logo após a saída do sistema condensador e outro no final do duto. Em cada ponto instalou-se mangueira para coleta de amostra do fluxo de ar-NH<sub>3</sub> que eram injetadas em erlenmeyer de 125 mL contendo solução de ácido bórico 20 g L<sup>-1</sup> com indicadores vermelho de metila e verde de bromocresol. A cada 24 h os erlenmeyers eram substituídos por outro e o teor de N-NH<sub>3</sub> foi dosado por meio de titulação com solução padrão de ácido clorídrico.

#### **2.4.2.3 Ensaio de amonificação e amonização**

Neste ensaio, utilizou-se cama de frango de 1 ciclo de uso, obtida em aviário com produção em sistema *dark-house*, com a densidade de 12 frangos/m<sup>2</sup>. A cama foi coletada logo após a retirada das aves, aos 45 d de crescimento. O volume de cama foi homogeneizado e destorroado manualmente. Utilizando-se 4 subamostras determinou-se gravimetricamente, com secagem a 102 °C que a umidade da cama era equivalente a 363,8 g kg<sup>-1</sup> de água. Outras subamostras foram secas em estufa a 65 °C até massa constante e foram analisadas para dosagem dos teores de C e N, por combustão a seco em analisador elementar CHNS (Perk Elmer modelo Series II 2400), constatando teores de 408,1 e 33,9 g kg<sup>-1</sup> de C e N, respectivamente, portanto, com C/N igual a 12/1.

Para o experimento utilizou-se uma massa de 50 kg de cama de aviário, ao qual adicionou água suficiente para elevar sua umidade da cama para o equivalente a 600 g kg<sup>-1</sup> de água. Avaliou-se a amonização de 100 mL das soluções de 9 mol L<sup>-1</sup> de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, 1,19 mol L<sup>-1</sup> de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub><sup>b</sup> de origem biogênica<sup>2</sup>, 4,5 mol L<sup>-1</sup> de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> + 4,5 mol L<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 2,38 mol L<sup>-1</sup> de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> + 1,19 mol L<sup>-1</sup> do H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub><sup>b</sup> e 4 mol L<sup>-1</sup> de HNO<sub>3</sub><sup>3</sup>. As soluções ácidas foram preparadas seguindo as reações de nº 2 a 8 (Tabela 1). Adotaram-se como referência para finalização do processo de amonização os valores de pH de soluções 1 mol L<sup>-1</sup> de NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> (pH 4,0), (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> (pH 8,0) e (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (pH 5,0), NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> (pH 5,5). Para a reação nº 8 considerou-se o pH 7,8, que foi o pH da mistura de 0,5 mol de (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> e (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, respectivamente.

#### 2.4.2.4 Obtenção dos sais sintetizados

Ao final do processo as soluções ácidas amonizadas foram transferidas para recipientes de vidro e secas em estufa a 70°C, até massa constante. Os recipientes contendo os sais cristalizados foram resfriados por 30 min em dessecador e, em seguida, os sais foram pesados e, depois, armazenados em recipientes fechados.

A eficiência da amonização (EA) foi estimada, relacionando a massa dos sais sintetizados em relação a massa molecular dos sais, de acordo com as reações (Tabela 1), conforme a equação abaixo:

$$EA (\%) = \frac{MR \times 10}{mM \times Mps} \times 100$$

onde, MR: massa real do sal sintetizado (g) na amonização de 100 mL de solução ácida; 10: fator de conversão para g.L<sup>-1</sup>; mM: massa molecular esperada de acordo com a estequiometria da reação de amonização (g mol<sup>-1</sup>); Mps: mols de produto sintetizado esperado.

#### 2.4.2.5 Caracterização química e físico-química dos sais

A caracterização química dos sais foi realizada de acordo com procedimentos para fertilizantes de acordo com o MAPA (2014), com adaptações nos métodos de dosagem para P e S. Para as análises químicas os sais foram secos em estufa a 50°C por 24h. Para análise de nitrogênio pesou-se 0,010 ± 0,001g de amostra dos sais que foi adicionado em tubos de destilação com posterior adição de 7 mL de água deionizada e homogeneização em aparelho agitador de tubos vortex. As amostras foram submetidas à destilação em destilador micro-

<sup>2</sup> Ácido sulfúrico biogênico, obtido pela oxidação de enxofre elementar por *Acidithiobacillus thiooxidans*

<sup>3</sup> Solução Nº 21, reação: NH<sub>3</sub> + HNO<sub>3</sub> → NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>, mM: 80,04 g mol<sup>-1</sup>, teor de N: 350 g kg<sup>-1</sup>.

Kjedahl, adicionando-se 10 mL de NaOH 10 mol L<sup>-1</sup>. A NH<sub>3</sub> liberada foi coletada em solução indicadora mista de ácido bórico 2% com verde de bromocresol e vermelho de metila. A solução resultante foi titulada com HCl 0,1 mol L<sup>-1</sup>. O mesmo procedimento foi adotado para uma prova em branco, sem a adição dos sais. Os teores de N foram obtidos pela fórmula:

$$N(g\ kg^{-1}\ N - NH_3) = \frac{(Vol.\ HCl - Vol.\ HCl\ br) * [HCl] * 14}{P}$$

onde: Vol. HCl: volume (mL) gasto de HCl; Vol. HClbr : volume (mL) gasto de HCl do branco; [HCl]: concentração HCl; 14: massa atômica do nitrogênio; P: massa da amostra.

Para a determinação de fósforo (P) e enxofre (S) pesou-se 0,5 ± 0,1g das amostras transferindo-se para recipientes de vidro de 100 mL. Adicionou-se 25 mL de solução de citrato neutro de amônio (CNA) e levou a chapa aquecedora até a ebulição, permanecendo por um período total de 3 horas. Após este período os recipientes foram mantidos em repouso até atingir temperatura ambiente e, em seguida, os extratos foram filtrados em papel filtro de porosidade média e transferidos para balão de 200 mL, utilizando lavagens sucessivas com pequenos volumes de água deionizada. Completou-se o volume do balão com posterior homogeneização, em seguida reservou um volume de 50 mL para dosagem por espectrometria de emissão ótica por plasma acoplado indutivamente (ICP-OES).

Foi medido o pH das soluções equivalente a 1 mol L<sup>-1</sup> dos sais formados tendo por referência as massas moleculares indicadas na tabela 1, seguido de homogeneização por 10 min com posterior determinação do pH. em potenciômetro digital.

#### **2.4.2.6 Cristalografia dos sais quanto às fases cristalinas (difratometria de raios-X)**

As amostras dos sais foram secas por 24 h a 50° em estufa e, em seguida, foram maceradas em almofariz de ágata. Igual procedimento foi aplicado para amostras dos reagentes analíticos NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> e (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> da VETEC<sup>®</sup>, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> da FMAIA<sup>®</sup>, NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> FMAIA<sup>®</sup> e para a mistura (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> + (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> na relação molar 1:1.

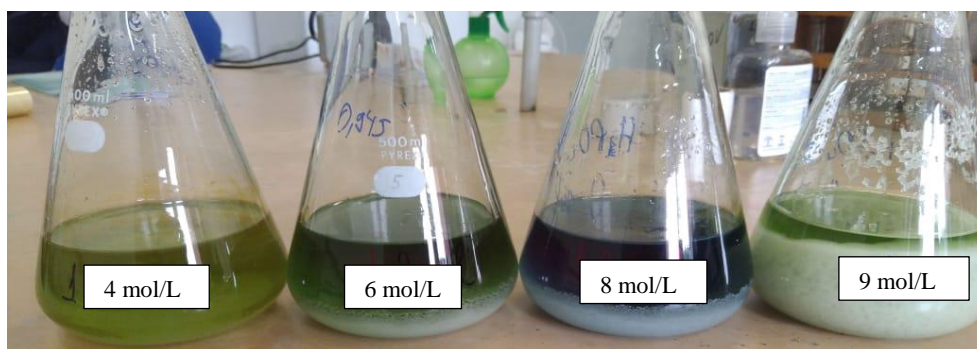
Pesaram-se 1,0 ± 0,1g das amostras que foram dispersas em lâminas de vidro escavadas (não orientadas; método do pó). As análises foram realizadas em difratômetro Panalytical X'PERT PRO PW 3040/60, equipado com tubo de cobalto (λ = 1,79026) e filtro de Fe, operando a 40 kV e 30 mA. As varreduras foram realizadas passo a passo na faixa de 4 a 60 °2θ com 0,05 °2θ de incremento e tempo de contagem de 3 s em cada etapa.

## 2.5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 2.5.1 Experimento 1. Simulação da captura de amônia

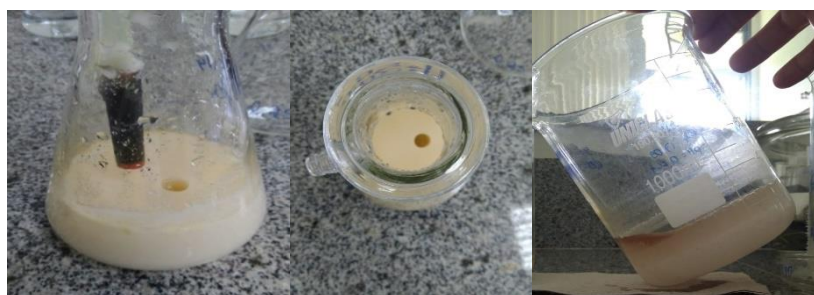
#### 2.5.1.1 Otimização da reação de amonização dos ácidos

Cerca de uma hora, desde o estabelecimento do fluxo de ar-NH<sub>3</sub>, percebeu-se o início de formação de cristais de sais nas bordas do tubo de borbulhamento imerso nas soluções com concentração de 4 mol L<sup>-1</sup> (nº 1, 9, 11 e 16, Tabela 2). Com a evolução do tempo de reação, nessas soluções os possíveis sais formados, se mantiveram solubilizados, mas nas soluções ácidas mais concentradas ocorreu intensa cristalização de sais (Figura 7).



**Figura 7.** Aumento da precipitação de sais com concentrações crescentes das soluções de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>

A partir de cerca de 8h e 30 min desde o início do fluxo de ar-NH<sub>3</sub>, observou-se alguma turbidez nas soluções acima de 9,0 mol L<sup>-1</sup> de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (nº 5, 6, 7 e 8, Tabela 2), 10,0 mol L<sup>-1</sup> de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (nº 15) e 10,0 mol L<sup>-1</sup> para a mistura dos ácidos (nº 20), o que se intensificou com o tempo até a formação de um produto de aspecto pastoso e leitoso, que se manteve em suspensão (Figura 8). Para estas concentrações não foi possível proceder a secagem para caracterização dos teores de N, P e S dos sais.



**Figura 8.** Formação de produto de aspecto pastoso a partir do processo de amonização da solução de ácido fosfórico.

O tempo das reações de amonização do  $\text{H}_3\text{PO}_4$  até a solução atingir a coloração verde variou de 3 a 11 h, aumentando com a concentração e os valores de pH variaram entre 3,55 e 4,14 (Tabela 3). Essas condições estão coerentes com pH de referência verificado para a solução de  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$  1 mol  $\text{L}^{-1}$  (pH 4,0). A síntese de sais aumentou proporcionalmente às concentrações do  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , (28,4 g/mol  $\text{L}^{-1}$ ), atingindo 255,5 g na concentração de 9,0 mol  $\text{L}^{-1}$  (Tabela 3). A eficiência da amonização do ácido (EA) estabelecida em relação a mM do  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$  alcançou entre 98 e 99 %, sugerindo que o fluxo de  $\text{NH}_3$  não limitou a amonização do  $\text{H}_3\text{PO}_4$ .

**Tabela 3.** Cor e acidez (pH<sub>am</sub>) da solução ácida amonizada; tempo para completar a amonização dos ácidos (tRam); rendimento e eficiência da amonização (EA)

Soluções	$\text{H}_3\text{PO}_4$	$\text{H}_2\text{SO}_4$	Cor da solução	pH <sub>am</sub>	tRam	Massa	EA
Nº	—mol/L—					—g—	—%—
1	4,0	-	Verde	4,14	03:20	113,37	98,55
2	6,0	-	Verde	3,95	04:00	169,76	98,38
3	8,0	-	Verde	4,02	10:00	226,83	98,59
4	9,0	-	Verde	3,55	11:00	255,50	98,71
9	4,0	-	Azul	7,68	08:45	124,61	94,36
10	6,0	-	Azul	7,80	10:00	187,12	94,96
11	-	4,0	Azul	6,15	05:00	127,90	96,79
12	-	6,0	Azul	7,24	14:00	190,97	96,34
13	-	8,0	Azul	6,82	19:00	255,24	96,57
14	-	9,6	Azul	6,54	34:40	308,26	97,20
16	2,0	2,0	Azul	8,88	05:20	122,85	99,40
17	3,0	3,0	Azul	8,30	07:45	189,65	102,30
18	4,0	4,0	Azul	7,27	11:50	248,42	100,50
19	4,5	4,5	Azul	5,92	23:00	271,81	97,75

A partir do momento em que as soluções 9 e 10, com 4,0 e 6,0 mol  $\text{L}^{-1}$  de  $\text{H}_3\text{PO}_4$  atingiram a cor azul (pH > 4,8) estendeu-se o tempo de reação até atingir o pH próximo de 8,0. Ressalta-se que foi percebido o cheiro de  $\text{NH}_3$  liberado do reator de amonização, quando, eventualmente, o pH foi ligeiramente superior a 8,0. Assim, o fluxo de  $\text{NH}_3$  foi interrompido a 8h e 45min e 10:00 h de reação e após não mais perceber o cheiro de amônia exalando dos reatores o pH das soluções foram de 7,68 e 7,8 (Tabela 3). Assim, considerando que a solução de  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$  1 mol  $\text{L}^{-1}$  apresentou pH 8,0, sugere-se que as condições de amonização foram favoráveis à síntese desse sal. Os rendimentos da síntese foram da ordem de 125 e 187 g para as concentrações de 4 e 6 mol  $\text{L}^{-1}$  (Tabela 3), sendo superiores aqueles obtidos com as soluções 1 e 2, em que a amonização foi interrompida em pH próximo a 4,0. No entanto, a eficiência de amonização foi 94 e 95% que é ligeiramente inferior (Tabela 3).

Quando as soluções 11 a 14, com concentrações de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  variando de 4,0 a 9,6 mol  $\text{L}^{-1}$  apresentaram coloração azul ( $\text{pH} > 4,8$ ) o fluxo de ar  $\text{NH}_3$  foi interrompido, o que ocorreu entre 5h e 34h de tempo de ensaio. Os valores de pH variaram de 6,15 a 7,24 (Tabela 3), ligeiramente acima do esperado, considerando-se o pH 5,0 da solução de  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  1 mol  $\text{L}^{-1}$ . Os rendimentos de 127,9 a 308,26 g aumentaram de forma proporcional com as concentrações (31,98 g/mol  $\text{L}^{-1}$ ), estimando-se uma EA de 96 e 97% (Tabela 3).

Para as soluções 16 a 19 com a mistura  $\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$  (Tabela 6), com a perspectivas de síntese do produto  $(\text{NH}_4)_x\text{H}_y\text{PO}_4\text{H}_z\text{SO}_4$ , adotou-se como indicador do fim do processo de amonização o cheiro de amônia liberado do reator. Assim, o tempo de reação variou de 5:20 a 23:00 h, aumentando com a concentração dos ácidos (Tabela 3). O pH medido após as soluções não mais exalarem cheiro de amônia decresceu de 8,8 para a solução de menor concentração (nº 16) até 5,92 para a solução de maior concentração (nº 19) (Tabela 3). O rendimento do sal sintetizado variou de 122,85 a 271,81 g, aumentando proporcionalmente com a concentração (59,93 g/mol  $\text{L}^{-1}$ ). As eficiências de amonização estabelecida em relação ao  $(\text{NH}_4)_3\text{H}_2\text{PO}_4\text{SO}_4$  (Tabela 1 Reação nº 7), como sal hipoteticamente formado, variou entre 97,7 e 102,3%.

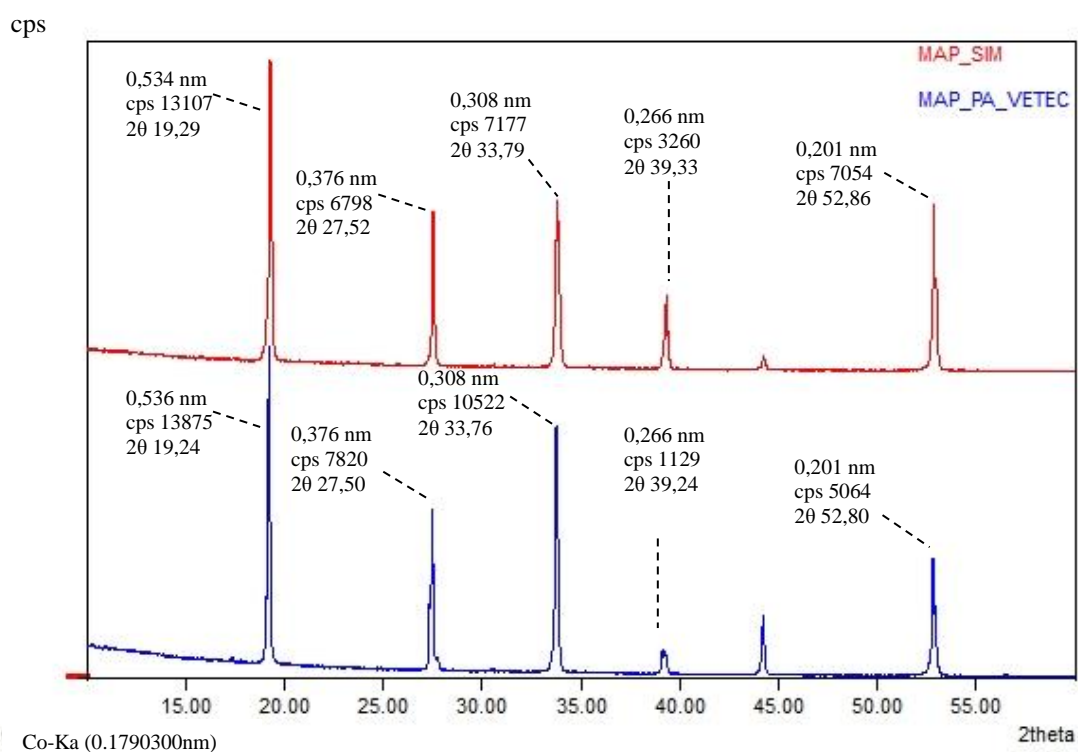
### 2.5.1.2 Características químicas e cristalográficas

Os sais resultantes da amonização das soluções de  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , com concentrações de 4,0 a 9,0 mol  $\text{L}^{-1}$ , apresentaram teores de N que variaram de 120,5 a 123,2 g  $\text{kg}^{-1}$  e de P entre 229,5 e 233,8 g  $\text{kg}^{-1}$  (Tabela 4), os quais se aproximam dos teores de N (121,7 g  $\text{kg}^{-1}$ ) e P (269,2 g  $\text{kg}^{-1}$ ) na composição molecular do  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$  (Tabela 1, nº2). A relação de massa N/P desses sais foi de 0,50, que também se aproxima da relação de 0,45 para o  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$  (Tabela 1). Soluções preparadas a partir dos sais sintetizados apresentaram pH entre 4,00 e 4,14 (Tabela 4) que se aproximam do pH 4,0 verificado para solução 1 mol  $\text{L}^{-1}$  de  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ .

Esses indicadores sugerem que a amonização do  $\text{H}_3\text{PO}_4$  resultou na síntese de  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ , de acordo com reação nº 2 (Tabela 1). A perfeita concordância entre os difratogramas de raios X para o sal sintetizado pela amonização da solução de  $\text{H}_3\text{PO}_4$  9 mol  $\text{L}^{-1}$  (MAP-SIM) e para o  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$  analítico (MAP-PA) (Figura 9), confirma que o sal sintetizado foi, de fato, o fosfato monoamônio. Adicionalmente, pela figura 9, observa-se que todas as reflexões do mineral Biphosphamita ( $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ), correspondente aos planos atômicos (101) 0,534nm; (200) = 0,376nm; (112) = 0,308nm; (202) = 0,266nm e (312) = 0,201nm se manifestam tanto no padrão analítico quanto no sol cristalizado experimentalmente.

**Tabela 4.** Teores e relação de N, P e S dos sais formados, acidez ( $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ ) de solução dos sais sintetizados, equivalente a  $1 \text{ mol L}^{-1}$  de acordo com as soluções ácidas

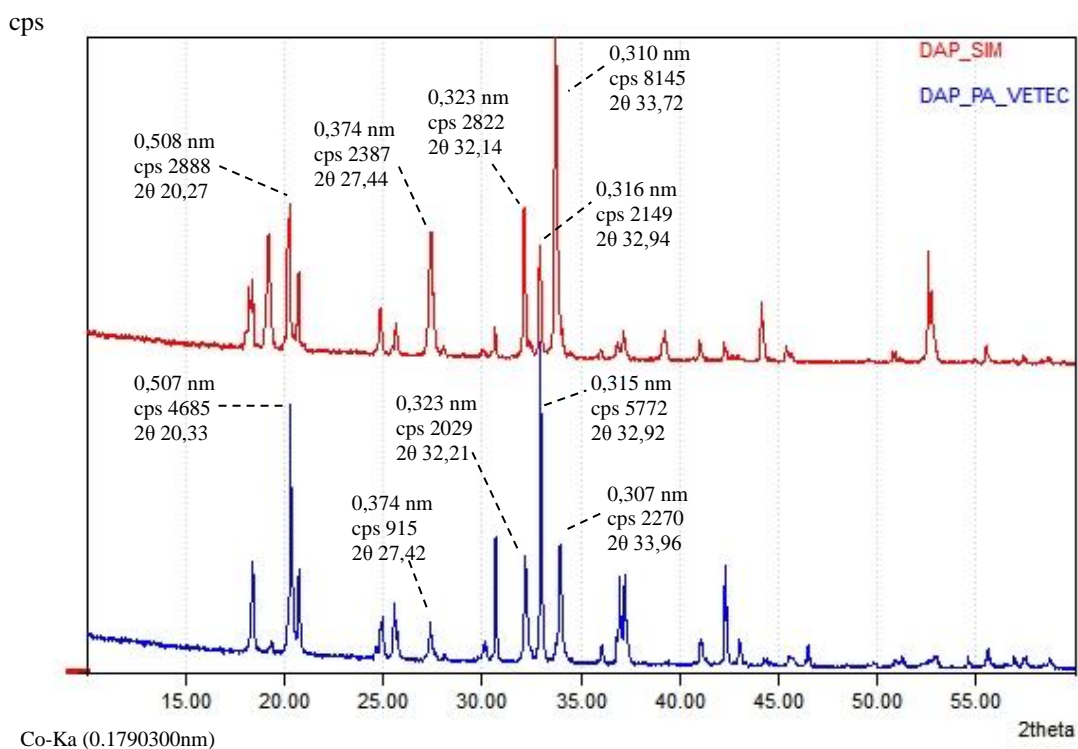
Soluções	$\text{H}_3\text{PO}_4$	$\text{H}_2\text{SO}_4$	N	P	S	N/P	N/S	N/P+S	pH
Nº	—mol L <sup>-1</sup> —		—g kg <sup>-1</sup> —						
1	4,0	-	120,50	233,00	-	0,52			4,14
2	6,0	-	120,70	233,80	-	0,52			4,07
3	8,0	-	122,70	230,60	-	0,53			4,00
4	9,0	-	123,20	229,50	-	0,54			4,03
9	4,0	-	210,20	214,20	-	0,98			6,29
10	6,0	-	210,70	211,00	-	1,00			6,67
11	-	4,0	204,10	-	245,00		0,83		4,26
12	-	6,0	208,30	-	245,90		0,85		4,57
13	-	8,0	193,60	-	246,10		0,79		4,43
14	-	9,6	213,80	-	243,00		0,88		4,64
16	2,0	2,0	193,00	101,90	123,90			0,85	5,97
17	3,0	3,0	203,60	107,50	118,10			0,90	6,48
18	4,0	4,0	210,30	108,00	116,60			0,94	6,48
19	4,5	4,5	192,20	104,80	124,30			0,84	5,83



**Figura 9.** Difractogramas de raios X para o sal sintetizado pela amonização da solução de  $\text{H}_3\text{PO}_4$   $9,0 \text{ mol L}^{-1}$  (MAP-SIM) e do reagente analítico  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$  (MAP-PA) da VETEC®.

A amonização das soluções com 4,0 e 6,0 mol L<sup>-1</sup> de  $\text{H}_3\text{PO}_4$  (Soluções 9 e 10, Tabela 4) se estendeu por mais tempo, até atingir pH 8,0, os sais produzidos apresentaram em torno de  $210 \text{ g kg}^{-1}$  de N e teores de P de 211,0 e 214,2 g kg<sup>-1</sup>, com relação N/P próxima de 1,00 (Tabela

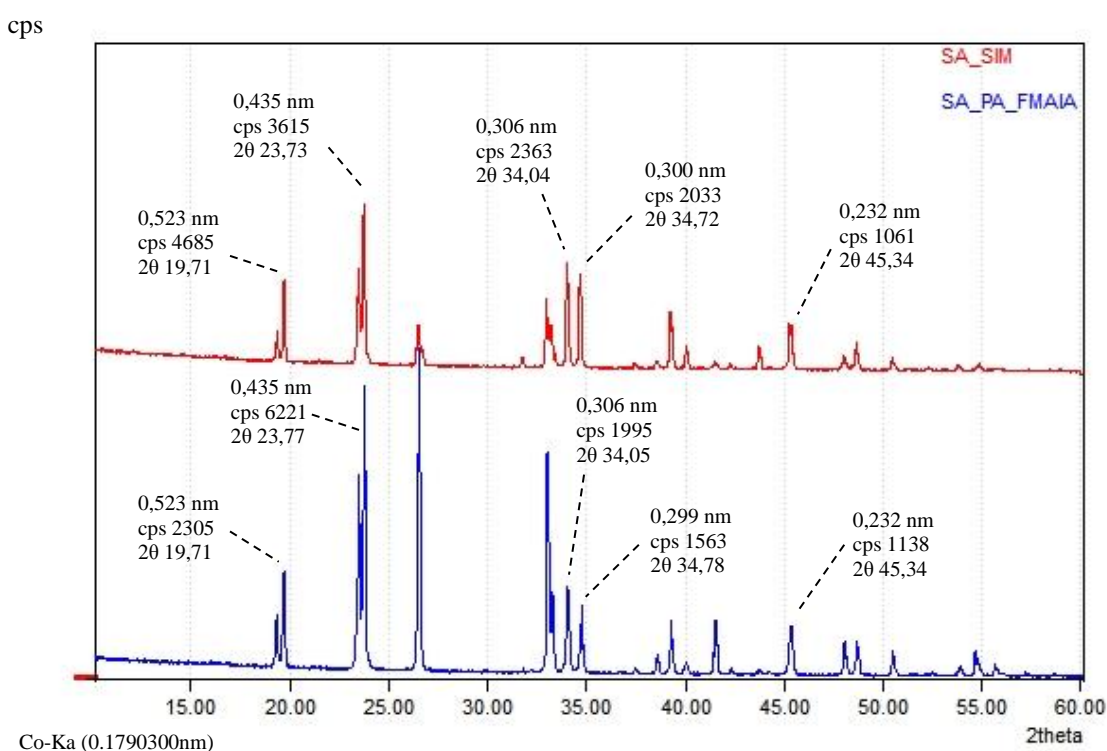
4). Os teores de P foram aquém daqueles esperados ( $234,5 \text{ g kg}^{-1}$ ) para o  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$  (Tabela 1, nº 3), mas os teores de N, assim como a relação N/P foram mais próximas dos valores esperados ( $212,10 \text{ g kg}^{-1}$  e 0,9 respectivamente). A dissolução desses sais produziu soluções com pH próximo a 6,5 (Tabela 4) que é inferior ao pH 8,0 de uma solução de  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$   $1 \text{ mol L}^{-1}$ . Ainda que os teores de P, e sobretudo o pH, sejam discrepantes daqueles atribuídos ao reagente  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ , os teores de N e a relação N/P corroboram com hipótese de que o principal sal sintetizado tenha sido o diamônio fosfato. Adicionalmente, a comparação dos difratogramas de raios X do sal produzido (DAP-SIM) com o do  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$  analítico (DAP-PA) (Figura 10), reforça a prevalência do fosfato diamônio no sal sintetizado. Foi possível observar na figura 10 que todas as reflexões do mineral Fosfamita  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ , correspondente aos planos atômicos 0,508 nm; 0,374 nm; 0,323 nm; 0,316 nm e 0,310 nm se manifestam tanto no padrão analítico quanto no sol cristalizado experimentalmente.



**Figura 10.** Difratogramas de raios X para o sal sintetizado pela amonização da solução de  $\text{H}_3\text{PO}_4$   $6 \text{ mol L}^{-1}$  (DAP-SIM) e para o reagente analítico  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$  (DAP-PA) da VETEC®

Os sais produzidos pela amonização das soluções com 4,0 a  $9,6 \text{ mol L}^{-1}$  de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (Soluções 11 a 14, Tabela 4) apresentaram teores de N que variaram de  $193,6$  a  $213,8 \text{ g kg}^{-1}$  e os de S foram da ordem de  $244 \text{ g kg}^{-1}$ , com relação N/S entre 0,79 e 0,88 (Tabela 4). Os valores de pH das soluções preparadas com os sais sintetizados variaram entre 4,26 e 4,64 (Tabela 4),

que são próximos ao pH 5,0 da solução 1 mol L<sup>-1</sup> de (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Essas características sugerem que a amonização do H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, de acordo com a reação n° 4 (Tabela 1), promoveu a síntese do sulfato de amônio. Essa hipótese se confirma pela comparação do difratograma de raios X do sal sintetizadas (SA-SIM) com aquele obtido para o reagente analítico (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (SA-PA) (Figura 11). Na figura 11 também foi possível observar que todas as reflexões do mineral Mascagnita (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, correspondente aos planos atômicos 0,523 nm; 0,435 nm; 0,306 nm; 0,300 nm e 0,232 nm se manifestam tanto no padrão analítico quanto no sol cristalizado experimentalmente.

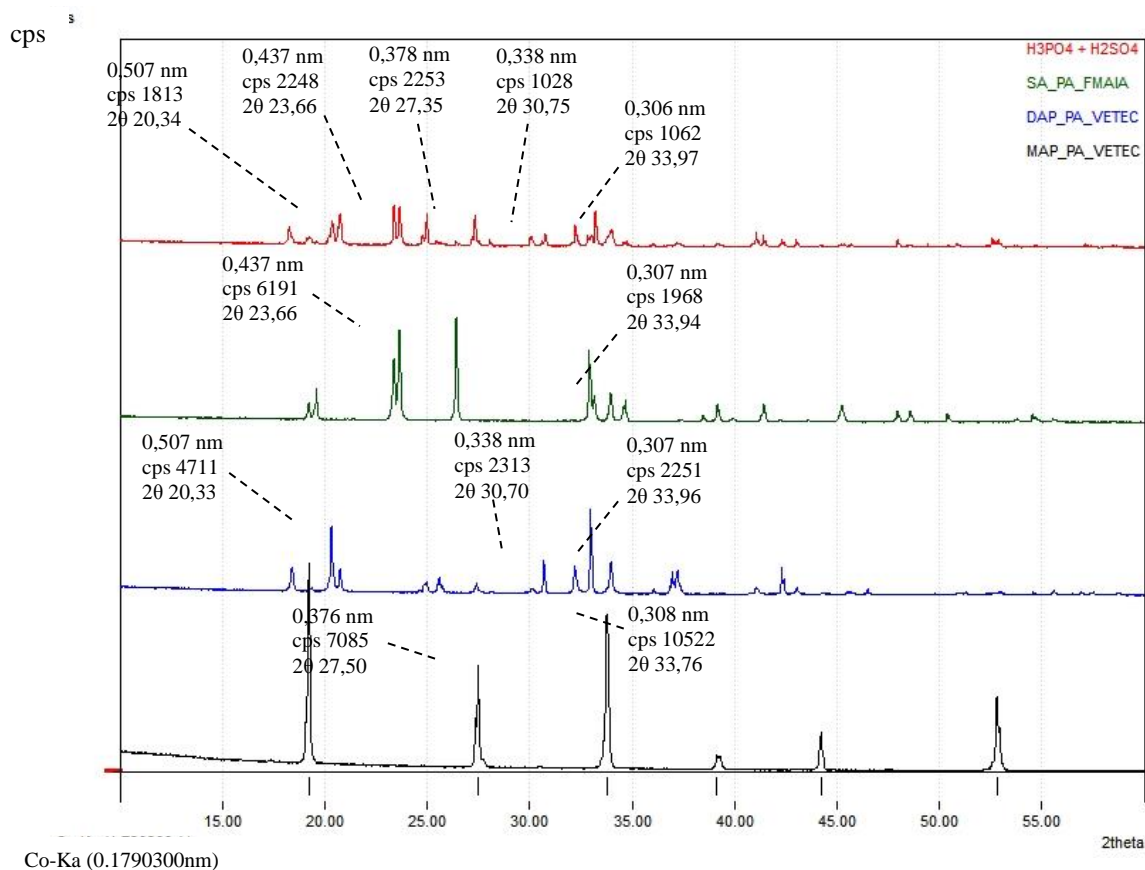


**Figura 11.** Difratogramas de raios X para o sal sintetizado pela amonização da solução de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 9,6 mol L<sup>-1</sup> (SA-SIM) e para o reagente analítico (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (SA-PA) da FMAIA®.

Os sais sintetizados pela amonização das soluções mistas de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> nas concentrações de 4,0 a 9,0 mol L<sup>-1</sup> (n° 16 a 19, Tabela 4) apresentaram de 192,2 a 210,3 g kg<sup>-1</sup> de N, 101,9 a 108,0 g kg<sup>-1</sup> de P e 116,6 a 124,3 g kg<sup>-1</sup> de S (Tabela 4) Ainda que, os teores de P tenham sido menores, esses teores de N são comparáveis àqueles nos sais obtidos com as soluções n° 9 e 10 (Tabela 4), nas quais ocorreu a síntese de (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>. Da mesma forma, apesar dos menores teores de S os teores de N também são mais próximos daqueles constatado no (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> produzido com as soluções n° 11 a 14 (Tabela 4). Os menores teores de P e S se deve ao fato de a mistura ácida ter sido constituída pela combinação H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, na relação molar 1:1. Os valores de pH para soluções com esses sais variaram entre 5,83 a 6,48 (Tabela

4), também são compatíveis com os valores de pH das soluções  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$  (Soluções 9 e 10) e  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  (Soluções 11 a 14). Os picos típicos de fosfato diamônio e sulfato de amônio presentes nos difratogramas de raios X (Figura 12) reforça as evidências de que esses dois sais tenham sido produzidos com a amonização da mistura ácida. No entanto, no difratograma desse sal misto, há também sinais que caracterizam a presença do fosfato monoamônio.

Essa equivalência fica mais evidente para Tetramônio fosfato sulfato  $((\text{NH}_4)_4\text{HPO}_4\text{SO}_4)$  (Reação 8, Tabela 1), considerando-se os teores de N, P e S, mas sobretudo a relação de massa entre N/P+S. Nos sais produzidos pelas soluções 16 a 19 essa relação variou entre 0,84 e 0,94 (Tabela 4), que se aproxima de 0,89, que é esperado para o Tetramônio fosfato sulfato complexo (Tabela 1)



**Figura 12.** Difratogramas de raios X para o sal sintetizado pela amonização da solução mista  $\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$   $9,0 \text{ mol L}^{-1}$  ( $\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$ -SIM) e dos reagentes analítico fosfato monoamônio (MAP-PA) e diamônio (DAP-PA) da VETEC<sup>®</sup> e sulfato de amônio (SA-PA) da FMAIA<sup>®</sup>.

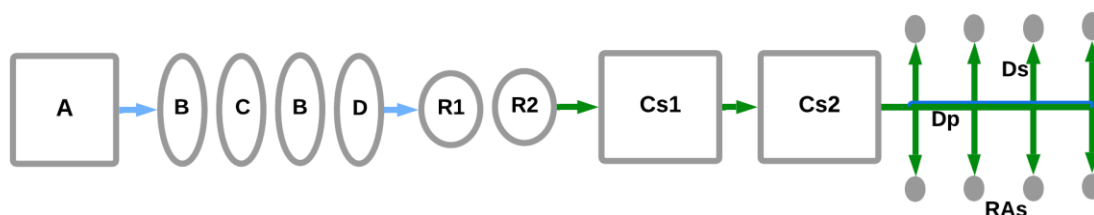
Verifica-se que o difratograma do sal produzido pela amonização da solução n°19 com teores  $192,2 \text{ g kg}^{-1}$  de N,  $104,8 \text{ g kg}^{-1}$  de P e  $124,3 \text{ g kg}^{-1}$  de S (Tabela 4), coincide com os picos observados para os padrões individuais de MAP, DAP e SA. Basicamente, os principais

picos do sal produzido têm a mesma posição dos picos que aparecem nos padrões individuais. Esse comportamento leva à suposição de que o sal formado é uma mistura destes três componentes individualizados. Entretanto, não se pode descartar a hipótese de se ter formado MAP, DAP e SA como fases individuais, misturadas no sal produzido, tenha-se formado um composto que seria uma combinação dos elementos N, P e S. Esse composto poderia ser o Diamônio fosfato sulfato (DAPS), cuja fórmula é  $(\text{NH}_4)_2\text{H}_3\text{PO}_4\text{SO}_4$  ou o Triamônio fosfato sulfato (T3AFS) de fórmula  $(\text{NH}_4)_3\text{H}_2\text{PO}_4\text{SO}_4$  ou ainda o Tetramônio fosfato sulfato (T4AFS) do qual a fórmula é  $(\text{NH}_4)_4\text{HPO}_4\text{SO}_4$  (Reações nº 6, 7, e 8, respectivamente, Tabela 1).

## 2.5.2 Experimento 2. Captura de amônia a partir da “compostagem” de cama de frango

### 2.5.2.1 Desenvolvimento e operacionalização de protótipo

Na operacionalização do protótipo de amonificação-amonização (Figura 13) a bomba (A) gerou o fluxo de ar e a pressurização do sistema. O fluxo de ar passou pelo purificador contendo solução de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (C) para remoção de possível contaminação com  $\text{NH}_3$  e pelo umidificador para umedecimento e desacidificação do ar (D), considerando que o contato com a solução de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  poderá reduzir a umidade e pequenas gotículas do ácido sulfúrico podem acidificar o ar. Os controladores de refluxo (B) instalados antes do purificador e do umidificador evitaram o possível retorno da solução de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ou de água até a bomba em caso de despressurização do sistema.

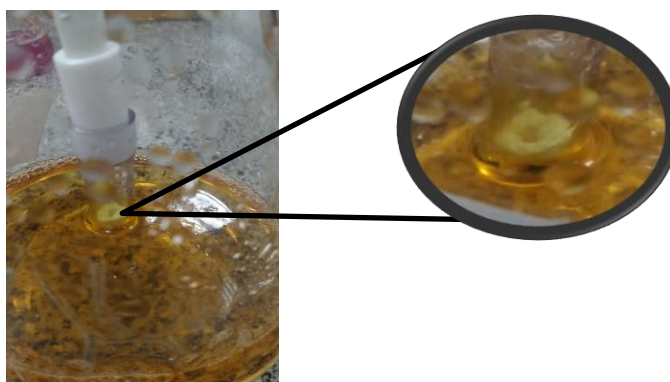


**Figura 13.** Representação esquemática do sistema de amonificação -amonização. Bomba de ar (A), Controladores de refluxo (B), Purificador com  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (C), Umidificador (D), Reatores de amonificação (R1 e R2), sistema desumificador (Cs1 e Cs2), duto principal (Dp), duto secundário (Ds), Reatores de amonização (RAs)

O fluxo ar foi injetado na base dos reatores de amonificação (R1 e R2) por meio de tubos PET com placa porosa na extremidade para promover a micro dispersão do ar. Os dois reatores operaram em paralelo. O fluxo de ar injetado passou através da massa da cama promovendo o carreamento da  $\text{NH}_3$  e vapor d'água (a partir de então obteve-se o ar- $\text{NH}_3$ ).

O ar-NH<sub>3</sub> carregava significativa quantidade de vapor d'água para os reatores de amonização (RAs), ocasionando o aumento do volume das soluções ácidas e alteração das concentrações. A partir desta observação foi adicionado ao sistema condensador (Cs1 e Cs2), entre os reatores de amonificação (R1 e R2) e a entrada do duto principal (Dp) (Figura 4). Assim, o fluxo o ar-NH<sub>3</sub> passou pelo sistema de desumidificação para remover o excesso de umidade. Para isso, o ar-NH<sub>3</sub> foi resfriado na câmara Cs1 e em seguida a umidade foi condensada na câmara de condensação Cs2. Na sequência o fluxo de ar-NH<sub>3</sub> foi conduzido pelos dutos principal (Dp) e secundário (Ds) até os reatores de amonização (Ras).

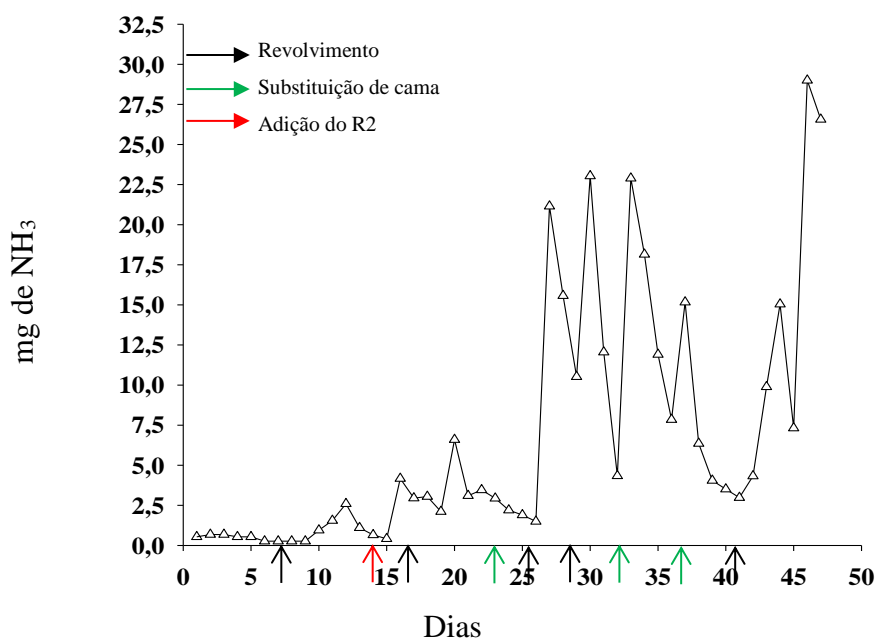
A ponta da extremidade final do duto secundário foi imersa na solução ácida para propiciar o borbulhamento e a agitação da solução, entretanto, devido à utilização de soluções concentradas, houve a formação de cristais na extremidade dos dutos (Figura 14) que ocasionou o entupimento e interrupção do processo de amonização nos RAs.



**Figura 14.** Detalhe evidenciando a cristalização de sais na extremidade do duto secundário.

Devido a isso diariamente os dutos passavam por vistoria e manutenção para evitar a novos entupimentos. Além disso, ao final do teste percebeu-se que não seria necessário a desumidificação do ar-NH<sub>3</sub> de forma contínua, pois o vapor d'água contribuiria para a alteração do volume da solução, conseqüentemente, reduzindo a concentração e a frequência de entupimento. Assim, durante os períodos noturnos, o sistema de resfriamento era interrompido por um intervalo de 7 a 10h.

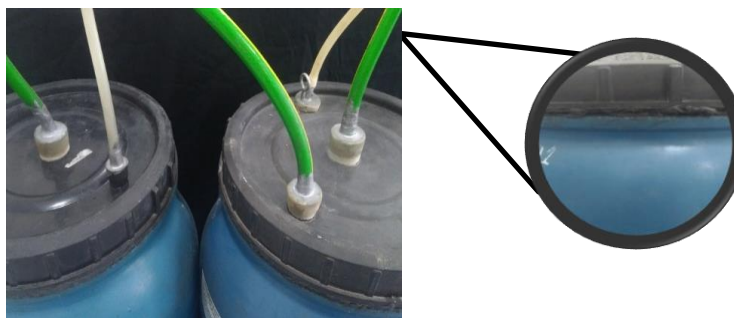
Nos primeiros 15 d de operação utilizou-se um reator de amonificação (R1) e neste período realizou-se uma única vez o revolvimento da cama de aviário por meio do rolamento manual do reator de amonificação. Entretanto, observou-se que os teores de NH<sub>3</sub> no fluxo de ar-NH<sub>3</sub> coletados diariamente, variavam entre 0,27 e 2,6 mg dia<sup>-1</sup> (Figura 15).



**Figura 15.** Análise dos teores de amônia no fluxo de ar-NH<sub>3</sub> durante a execução do teste de protótipo

Em vista disso, no 16º d incluiu-se um segundo reator (R2), acoplado em paralelo ao R1 para potencializar a produção de NH<sub>3</sub>. De fato, houve o aumento nos teores de N-NH<sub>3</sub> variando de 1,5 a 29 mg (Figura 15). Nota-se que o revolvimento intensificou a amonificação, haja vista que picos mais expressivos dos teores de NH<sub>3</sub> são observados logo após o evento de revolvimento. Assim definiu-se uma frequência de dois revoltimentos por semana. Para isto, a cama de aviário dos dois reatores era transferida para uma lona plástica em seguida era revolvida com movimentos laterais e de revolução da lona e depois volumes equivalentes eram retornados para os reatores.

Durante a execução dos testes, constatou-se o vazamento de ar-NH<sub>3</sub> pelas tampas dos reatores de amonificação. Este fato, além de ocasionar a diminuição da concentração de amônia no fluxo de ar, gerava a perda de pressão ao longo dos dutos de transporte, conseqüentemente, o processo de amonização era interrompido em alguns RAs permanecendo por até 7 horas. Para tal ajuste utilizou-se de produto a base de borracha sintética, óleos e minerais, popularmente conhecido como “massa de calafetar” (Figura 16). A massa de calafetar era removida a cada período de revolvimento e, após o processo, era novamente adicionada nas tampas dos reatores.



**Figura 16.** Detalhe da vedação da tampa do reator de amonificação

Ao 26° e ao 36° dia de operação do protótipo, a cama dos reatores foi substituída por nova massa de 25 kg/reator da cama de aviário, previamente umedecido. No 40° dia o funcionamento do sistema foi interrompido por um período de 20 d, por limitações de operacionalização. Após este período ocorreu nova substituição da cama dos reatores como já descrito e o sistema foi mantido em operação por mais sete dias.

- Teste de amonização das soluções

A partir do momento em que as soluções N° 4 de  $9,0 \text{ mol L}^{-1}$  de  $\text{H}_3\text{PO}_4$  atingiram a cor verde ( $3,8 > \text{pH} < 4,8$ ), o fluxo de  $\text{NH}_3$ , direcionado para os respectivos RAs, foi interrompido e foi medido pH das soluções, que indicaram valor de pH 4,5 (Tabela 5). Assim, de acordo com o valor de pH para a solução de  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$   $1 \text{ mol L}^{-1}$  (pH 4,0), sugere-se que as condições de amonização foram favoráveis à síntese desse sal. Os rendimentos da síntese foram de 86,16 g equivalente a EA de 83% (Tabela 5), inferior ao esperado (Reação n° 2, Tabela 1).

Quando as soluções com concentração de  $9,0 \text{ mol L}^{-1}$  de  $\text{H}_3\text{PO}_4$  (solução n° 9, Tabela 1) apresentaram coloração azul ( $\text{pH} > 4,8$ ) o pH foi medido com maior frequência em intervalos de 5 h, até atingir o pH 8,0. O fluxo de ar  $\text{NH}_3$  foi interrompido, e em seguida mediu-se o pH das soluções, que indicaram valores médios de 8,04 (Tabela 5). O rendimento dos sais sintetizados foi de 90,88 g, inferior ao estimando (118,54g), com EA de 76,5% (Tabela 5).

**Tabela 05.** Cor da solução ácida amonizada, acidez da solução amonizada (pH am), rendimento e eficiência da amonização

Soluções	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Cor da solução	pH <sub>am</sub>	Massa	EA
Nº	— mol L <sup>-1</sup> —				— g —	—%—
4	9,0	-	Verde	4,50	86,16	83,00
9 <sup>4</sup>	9,0	-	Azul	8,04	90,88	76,46
14	-	9,6	Azul	7,66	88,05	69,40
19	4,5	4,5	Azul	7,28	82,87	74,43

As soluções de nº14, com concentração de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 9,6 mol L<sup>-1</sup> ao apresentarem coloração azul (pH > 4,8) o fluxo de ar NH<sub>3</sub> foi interrompido, e o pH foi medido. O valor de pH foi de 7,6 (Tabela 5), superior ao esperado, considerando-se o valor de pH para solução de (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1 mol L<sup>-1</sup> (pH 5,0). Na amonização das soluções obteve-se rendimento de 88,05 g, com EA de 69,4%, o valor corresponde a uma perda de 30,6% de EA (Tabela 5).

Para as soluções de nº19 com a mistura de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> de concentração 9,0 mol L<sup>-1</sup> (Tabela 5) ao atingirem a coloração azul (pH > 4,8) fez-se o monitoramento do pH em intervalos com frequência de 5 h até atingir valores próximos a pH 7,8. O fluxo de ar foi interrompido, e o pH das soluções foram medidos, obtendo valores de pH 7,3 (Tabela 5). O rendimento de sal sintetizado nas reações destas soluções (nº 19), foi de 82,87g. A eficiência de amonização estabelecida em relação (NH<sub>4</sub>)<sub>3</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>SO<sub>4</sub> (reação nº 7, Tabela 1), como sal hipoteticamente formado, foi de 83,8%, com 16,2% abaixo do esperado (98,89g).

- Características químicas

Os sais resultantes da amonização das soluções de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, com concentração de 9,0 mol L<sup>-1</sup> (Tabela 6) apresentaram teores médios de N de 122,5 g kg<sup>-1</sup> e 244,6 g kg<sup>-1</sup> de P (Tabela 6), os quais se aproximam dos teores de N e P (121,7g e 269,2g) na composição molecular do NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> (reação nº 2, Tabela 1). A relação de massa N/P dos sais foi de 0,50, que também se aproxima da relação de 0,45 para o NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> (Tabela 1). As soluções preparadas a partir dos sais sintetizados, apresentaram pH 4,10 (Tabela 6), que é similar ao pH verificado para solução 1 mol L<sup>-1</sup> de NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> (pH 4,0).

<sup>4</sup> Reação N°3 (Tabela 1) síntese de (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>

**Tabela 6.** Teores e relação de N, P e S dos sais formados e acidez (pH<sub>H<sub>2</sub>O</sub>) de solução dos sais sintetizados, equivalente a 1 mol L<sup>-1</sup> de acordo com as soluções ácidas

Soluções	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	N	P	S	N/P	N/S	N/P+S	pH
Nº	— mol L <sup>-1</sup> —		— g kg <sup>-1</sup> —						
4	9,0	-	122,50	244,60	-	0,50			4,10
9 <sup>4</sup>	9,0	-	181,30	223,90	-	0,81			6,62
14	-	9,6	215,70	-	230,00		0,94		5,03
19	4,5	4,5	177,90	110,80	118,60			0,77	6,13

Os sais produzidos a partir da amonização das soluções com 9,0 mol L<sup>-1</sup> de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (reação N<sup>o</sup>3, Tabela 1), apresentaram teor em torno de 181,3 g kg<sup>-1</sup> de N e teores de P de 223,9 g kg<sup>-1</sup>, com relação N/P 0,81 (Tabela 6). Os teores de P foram equivalentes daqueles esperados (234,5g) para o (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> (Tabela 1), mas os teores de N, assim como a relação N/P foram mais próximas dos valores esperados (N/P 0,9). A dissolução desses sais produziu soluções com pH 6,6 (Tabela 6), inferior ao pH 8,0 da solução de referência (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 1 mol L<sup>-1</sup>.

Para as soluções de 9,6 mol L<sup>-1</sup> de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (n<sup>o</sup> 14, Tabela 6) os sais sintetizados apresentaram teores de 215,7 g kg<sup>-1</sup> de N e os de S foram da ordem de 230 g kg<sup>-1</sup>, com relação N/S de 0,94 (Tabela 6). A partir da dissolução dos sais se obteve valores de pH 5,03 (Tabela 6), que são iguais ao pH 5,0 da solução 1 mol L<sup>-1</sup> de (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Essas características sugerem que a amonização do H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, de acordo com a reação n<sup>o</sup> 4 (Tabela 1), promoveu a síntese do sulfato de amônio.

Após o processo de amonização das soluções mistas de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (n<sup>o</sup> 19, Tabela 6), os sais apresentaram teores médios de 177,2 g kg<sup>-1</sup> de N, 110,8 g kg<sup>-1</sup> de P e 118,6 g kg<sup>-1</sup> de S (Tabela 6) Os teores de N aproximam-se àqueles dos sais hipotéticos de referência (reação n<sup>o</sup> 7, tabela 1), entretanto, não foi observado o mesmo padrão para P e S. Os valores de pH para as soluções com esses sais quando dissolvidos foi de 6,13 (Tabela 6), que é análoga aos valores de pH das soluções tidas como (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> (soluções 9 e 10) do experimento de simulação.

### 2.5.2.2 Avaliação da amonização a partir de cama de frango

Após as soluções de 9,0 mol L<sup>-1</sup> de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (solução n<sup>o</sup>4, Tabela 7) atingirem a coloração de referência, o fluxo de ar foi interrompido e o RA (reator de amonização) foi substituído por outro contendo 100 mL de água, igual procedimento aplicado aos demais RA. Os valores de pH obtidos foram de 5,64 (Tabela 7), acima do pH de referência verificado para a solução de NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 1 mol L<sup>-1</sup> (pH 4,0), com efeito, a solução apresentou coloração azul ao final da

amonização. Com o rendimento de 104,22 g, e EA de 100% dos sais sintetizados, sugere-se que durante o processo de amonização não houve limitação do fluxo de  $\text{NH}_3$ .

**Tabela 7.** Cor da solução ácida amonizada, acidez da solução amonizada (pH am), rendimento e eficiência da amonização (EA)

Soluções	$\text{H}_3\text{PO}_4$	$\text{HNO}_3$	$\text{H}_2\text{SO}_4$	$\text{H}_2\text{SO}_4\text{b}^5$	Cor da solução	pH am	Massa	EA
Nº	mol L <sup>-1</sup>						g	%
4	9,0	-	-	-	Azul	5,65	104,22	100,60
9 <sup>4</sup>	9,0	-	-	-	Azul	8,51	110,57	93,00
21	-	4,0	-	-	Azul	7,75	31,51	98,30
19	4,5	-	4,5	-	Azul	8,60	108,05	97,00
19	2,38	-	-	1,19	Azul	7,98	39,50	97,39
11 <sup>6</sup>	-	-	-	1,19	Azul	8,05	15,45	98,31

A partir do momento em que as soluções de 9,0 mol L<sup>-1</sup> de  $\text{H}_3\text{PO}_4$  (Solução nº9, Tabela 7) atingiram a cor azul (pH > 4,8) estendeu-se o tempo de reação com monitoramento do pH em intervalos de 5 h até atingir o pH próximo de 8,0. Assim, o fluxo de  $\text{NH}_3$  foi interrompido e o pH das soluções foi medido, que indicaram valor de pH 8,51 (Tabela 7). Assim, de acordo com o valor de pH para a solução de  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$  1 mol L<sup>-1</sup> (pH 8,0), sugere-se que as condições de amonização foram favoráveis à síntese desse sal. Os rendimentos obtidos a partir da síntese dos sais foram da ordem de 110,5 g sendo inferior àqueles observados para os sais analíticos de referência (Reação nº3, Tabela 1), por conseguinte, a eficiência de amonização foi de 93 %, (Tabela 7).

As soluções de nº21, com concentração de 4,0 mol L<sup>-1</sup> de  $\text{HNO}_3$ , ao apresentarem coloração azul (pH > 4,8), o fluxo de ar  $\text{NH}_3$  foi interrompido. Os valores de pH obtidos foram de 7,75 (Tabela 7), superiores ao valor de pH para solução de  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  de 1 mol L<sup>-1</sup> (pH 5,5). Os rendimentos de 31,51 g dos sais sintetizados foram suficientes para que a EA atingisse 98% (Tabela 7).

Para as soluções de nº19 com a mistura de  $\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$  de concentração 9,0 mol L<sup>-1</sup> (Tabela 7) ao atingirem a coloração azul (pH > 4,8) fez-se o monitoramento do pH em intervalos de 6 h até atingir valores próximos a pH 7,8. O fluxo de ar foi interrompido, e o pH das soluções foram medidos, obtendo valores de pH variando de 8,0 a 8,6. Os rendimentos de sais sintetizados foram de 108,05 g para a mistura  $\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$  e 39,5 g para a solução contendo ácido biogênico ( $\text{H}_2\text{SO}_4\text{b}$ ). As eficiências de amonização para ambas as soluções estabelecidas

<sup>5</sup>  $\text{H}_2\text{SO}_4$  obtido a partir de processo biológico

<sup>6</sup> Solução de amonização referente a síntese de  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  de concentração inferior ao referencial (4,0 mol L<sup>-1</sup>)

em relação  $(\text{NH}_4)_3\text{H}_2\text{PO}_4\text{SO}_4$  (reação nº 7, Tabela 1) foram similares, com eficiência de 97,4%, sugerindo que o processo de amonização para o ácido biogênico não difere das fontes comerciais de ácidos.

As soluções de nº11, com concentração de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  1,19 mol L<sup>-1</sup> (Tabela 7) ao apresentarem coloração azul (pH > 4,8), o fluxo de ar  $\text{NH}_3$  foi interrompido, e o pH da solução amonificada foi medido. O valor de pH foi de 8,05 (Tabela 7), superior ao esperado, considerando-se o valor de pH para solução de  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  1 mol L<sup>-1</sup> (pH 5,0). Na amonização da solução obteve-se rendimento de 15,45 g, com EA de 98,31%

### 2.5.2.3 Características químicas e cristalográficas

A síntese dos sais a partir das soluções de  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , com concentrações de 9,0 mol L<sup>-1</sup> apresentaram teores de N de 159,7 g kg<sup>-1</sup> e 237,10 g kg<sup>-1</sup> de P (soluções nº4, Tabela 8), os quais se aproximam dos teores de N e P na composição molecular do  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$  (Tabela 1). A relação de massa N/P desses sais foi de 0,67, que é superior a relação de 0,45 para o  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$  (Tabela 1). A dissolução dos sais apresentou pH 4,02 (Tabela 8), resultado similar ao pH 4,0 verificado para solução 1 mol L<sup>-1</sup> de  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ .

**Tabela 8.** Teores e relação de N, P e S dos sais formados, acidez (pH) de solução dos sais sintetizados, equivalente a 1 mol L<sup>-1</sup> de acordo com as soluções ácidas

Soluções	$\text{H}_3\text{PO}_4$	$\text{HNO}_3$	$\text{H}_2\text{SO}_4$	$\text{H}_2\text{SO}_4$ b	N	P	S	N/P	N/S	N/P+S	pH
Nº	mol L <sup>-1</sup>				g kg <sup>-1</sup>						
4	9,0	-	-	-	159,70	237,10	-	0,67			4,02
9 <sup>4</sup>	9,0 <sup>4</sup>	-	-	-	185,30	224,50		0,82			5,90
21	-	4,0	-	-	265,00	-	-	-			5,45
19	4,5	-	4,5	-	187,30	105,60	121,30			0,82	6,32
19	2,38	-	-	1,19	170,20	133,70	80,10			0,80	4,95
11 <sup>7</sup>	-	-	-	1,19	204,90	-	197,0		1,04		4,91

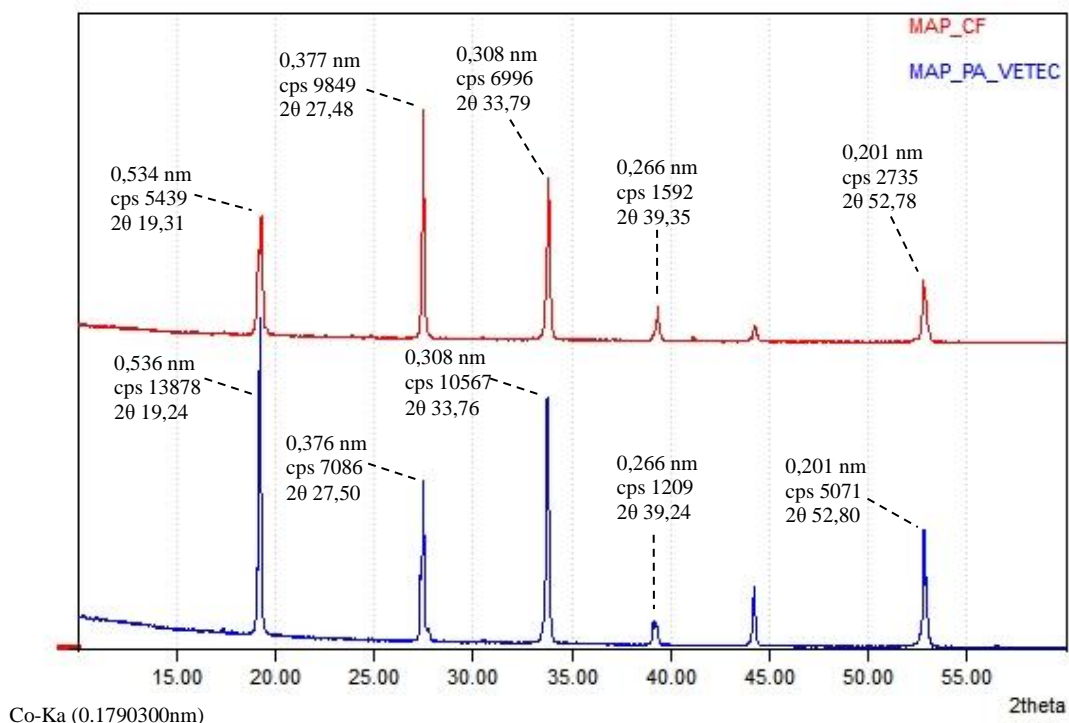
Esses indicadores sugerem que a amonização do  $\text{H}_3\text{PO}_4$  resultou na síntese de fosfato monoamônio, de acordo com reação nº 2 (Tabela 1). Há uma perfeita coincidência entre os picos dos difratogramas de raios X para o sal sintetizado pela amonização da solução de  $\text{H}_3\text{PO}_4$  9 mol L<sup>-1</sup> (MAP-CF) com o  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$  analítico (MAP-PA) (Figura 17). Nota-se a correspondência dos picos e a distância entre os planos atômicos do sal sintetizado (0,534; 0,377; 0,308; 0,266; 0,201 nm) com o MAP-PA (0,536; 0,376; 0,308; 0,266; 0,201 nm). A

<sup>7</sup> Solução de amonização referente a síntese de  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  de concentração inferior ao referencial (4,0 mol L<sup>-1</sup>)

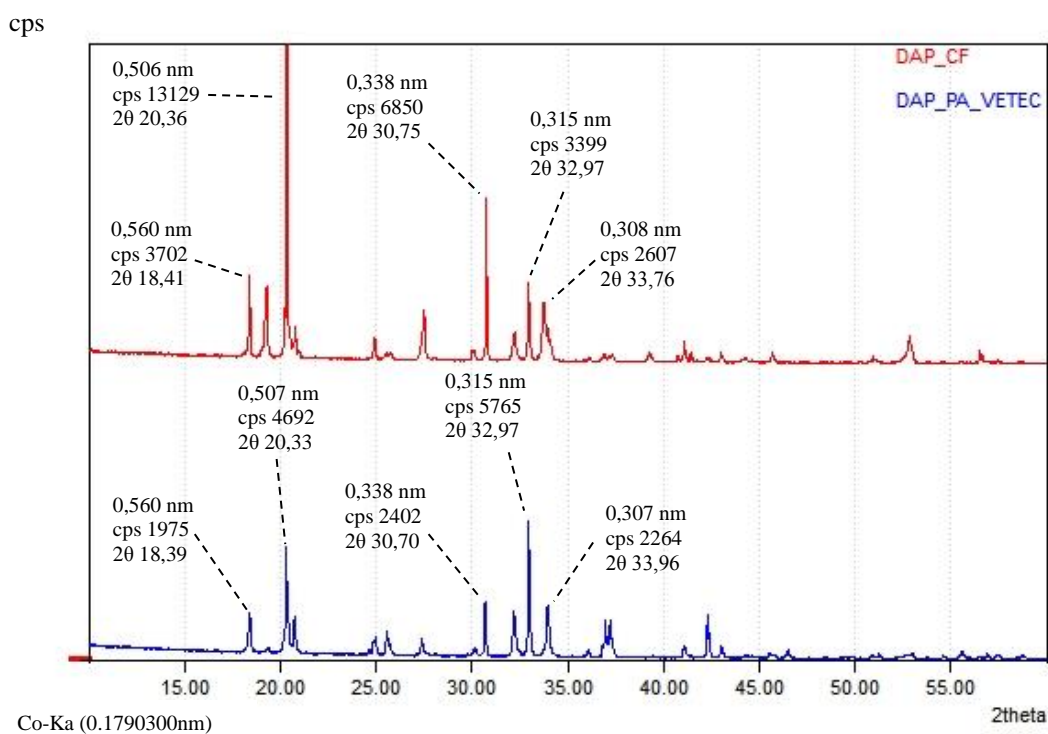
comparação entre os dois difratogramas não deixa dúvida nenhuma da formação do fosfato monoamônio e confirma que o sal sintetizado foi, de fato, o esperado.

Com a amonização das soluções com  $9,0 \text{ mol L}^{-1}$  de  $\text{H}_3\text{PO}_4$  (Soluções nº 9, Tabela 8) os sais produzidos apresentaram em torno de  $185,3 \text{ g kg}^{-1}$  de N e teores de P de  $224,5 \text{ g kg}^{-1}$ , com relação N/P próxima de 0,82 (Tabela 8). Os teores de P e N foram próximo aos esperados para o  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$  (Tabela 1), assim como a relação N/P que foram mais próximas dos valores esperados de 0,90. A dissolução desses sais produziu soluções com pH próximo a 5,9 (Tabela 8) que é inferior ao pH 8,0 de uma solução de  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$   $1 \text{ mol L}^{-1}$ . Ainda que os valores do pH sejam discrepantes daqueles atribuídos ao reagente  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ , os teores de N e P e a relação N/P confirmam a hipótese de que o sal sintetizado tenha sido o fosfato diamônio. A comparação dos difratogramas de raios X do sal produzido (DAP-CF) com o do  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$  analítico (DAP-PA) (Figura 18) reforça a possibilidade de prevalência do fosfato diamônio no sal sintetizado. De fato, a maioria dos picos dos dois difratogramas são concordantes, além disso observa-se a proximidade entre os planos atômicos entre o DAP-CF (0,560; 0,506; 0,338; 0,315; 0,308 nm) e o DAP-PA (0,560; 0,507; 0,338; 0,315; 0,307 nm) para os mesmos planos atômicos, reforçando a formação do sal de composição do fosfato diamônio.

cps

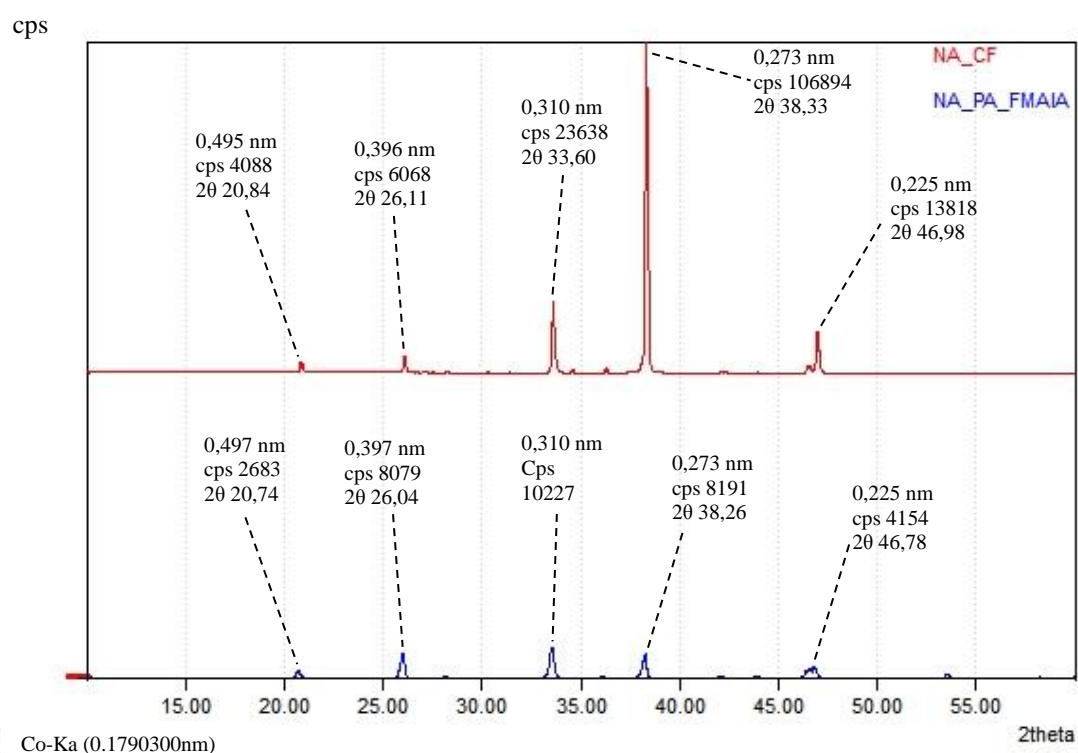


**Figura 17.** Difratogramas de raios X para o sal sintetizado pela amonização da solução de  $\text{H}_3\text{PO}_4$   $9 \text{ mol L}^{-1}$  (MAP-CF) e do reagente analítico  $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$  (MAP-Padrão) da VETEC®.



**Figura 18.** Difratomogramas de raios X para o sal sintetizado pela amonização da solução de  $\text{H}_3\text{PO}_4$  9 mol  $\text{L}^{-1}$  (DAP-CF) e para o reagente analítico  $(\text{NH}_4)_2\text{H}_2\text{PO}_4$  (DAP-PA) da VETEC®

A amonização das soluções com 4,0 mol  $\text{L}^{-1}$  de  $\text{HNO}_3$  (Soluções nº21, Tabela 8) produziu sais que apresentaram teores de N de 265,6 g  $\text{kg}^{-1}$ , inferior ao teor esperado de 350,0 g  $\text{kg}^{-1}$  do sal analítico  $\text{NH}_4\text{HNO}_3$ . O pH das soluções preparadas com os sais sintetizados foi de 5,45 (Tabela 8), análogo ao pH 5,5 da solução 1 mol  $\text{L}^{-1}$  de  $\text{NH}_4\text{HNO}_3$ . Apesar de o teor de N ser inferior ao esperado, os difratograma de raio X do sal sintetizadas (NA-CF) quando comparados com aquele obtido para o reagente analítico  $\text{NH}_4\text{HNO}_3$  (NA-PA) (Figura 19) confirma a formação do sal nitrato de amônio.

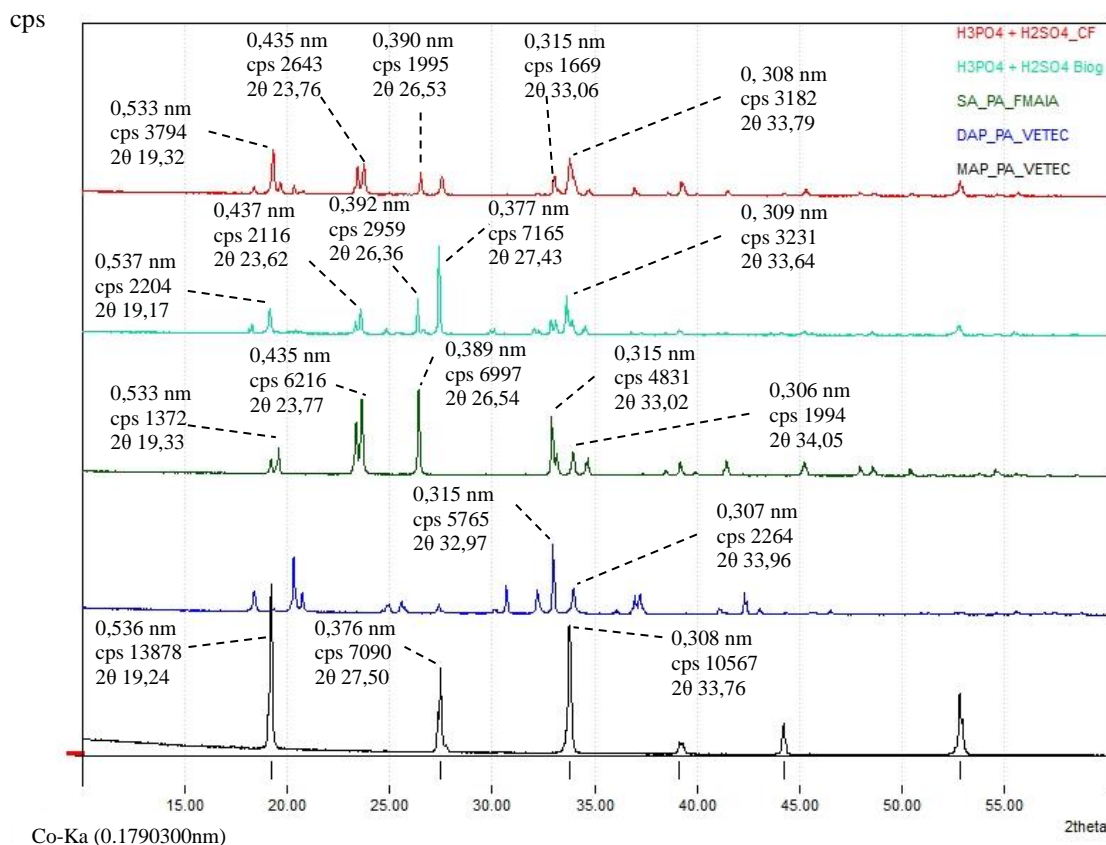


**Figura 19.** Difratomogramas de raios X para o sal sintetizado pela amonização da solução de  $\text{HNO}_3$   $4,0 \text{ mol L}^{-1}$  (NA-CF) e para o reagente analítico  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  (NA-PA) da FMAIA®.

A correspondência da posição dos picos é muito boa, quando comparado a distância dos planos atômicos para o NA-CF foram de 0,495; 0,396; 0,310; 0,273; e 0,225 nm, e para NA-PA foram de 0,497; 0,397; 0,310; 0,273; e 0,225 nm, observa-se a similaridade entre os difratogramas. De forma mais expressiva neste sal sintetizado, observa-se a intensidade (cps), especialmente do pico mais intenso ( $2\theta$  38,33; 0,273 nm) do  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  produzido pela cama de aviário é bem mais intensa (cps 106894) que a intensidade do mesmo ( $2\theta$  38,26; 0,273 nm) pico no padrão (cps 8191). A intensidade deste pico nesse sal atingiu uma contagem de mais de 100.000 cps, o que não foi observado para nenhum outro sal formado ou padrão analisado no experimento, todos sob as mesmas condições.

Os sais sintetizados pela amonização das soluções mistas de  $\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$  e mistura com  $\text{H}_2\text{SO}_4$  nas concentrações de  $9,0$  e  $3,57 \text{ mol L}^{-1}$  (nº 19 e 11, tabela 8), respectivamente, apresentaram  $187,3$  e  $170,2 \text{ g kg}^{-1}$  de N,  $105,5$  e  $133,7 \text{ g kg}^{-1}$  de P e  $121,3$  e  $80,1 \text{ g kg}^{-1}$  de S (Tabela 8). Ainda que, os teores de P tenham sido menores, esses teores de N são comparáveis àqueles dos sais hipotéticos  $(\text{NH}_4)_3\text{H}_2\text{PO}_4\text{SO}$  (reação nº7, tabela 1). Os valores de pH para soluções com esses sais foram de 6,32 para o sal sintetizado  $(\text{NH}_4)_x\text{H}_y\text{PO}_z\text{SO}$  (Tabela 8), e 4,95 para o sal sintetizado  $(\text{NH}_4)_x\text{H}_y\text{PO}_z\text{SO}$  biogênico. Para o sal biogênico, observa-se que o menor pH se deve a menor concentração de ácido sulfúrico adicionada a solução, diferindo do pH obtido pelo produto da mistura  $\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$ . Os picos típicos de fosfato mono e diamônio e

sulfato de amônio presentes no difratograma de raios X (Figura 20), assim como a semelhança com as distâncias dos planos atômicos, reforça as evidências de que esses sais tenham sido produzidos com a amonização da mistura ácida.

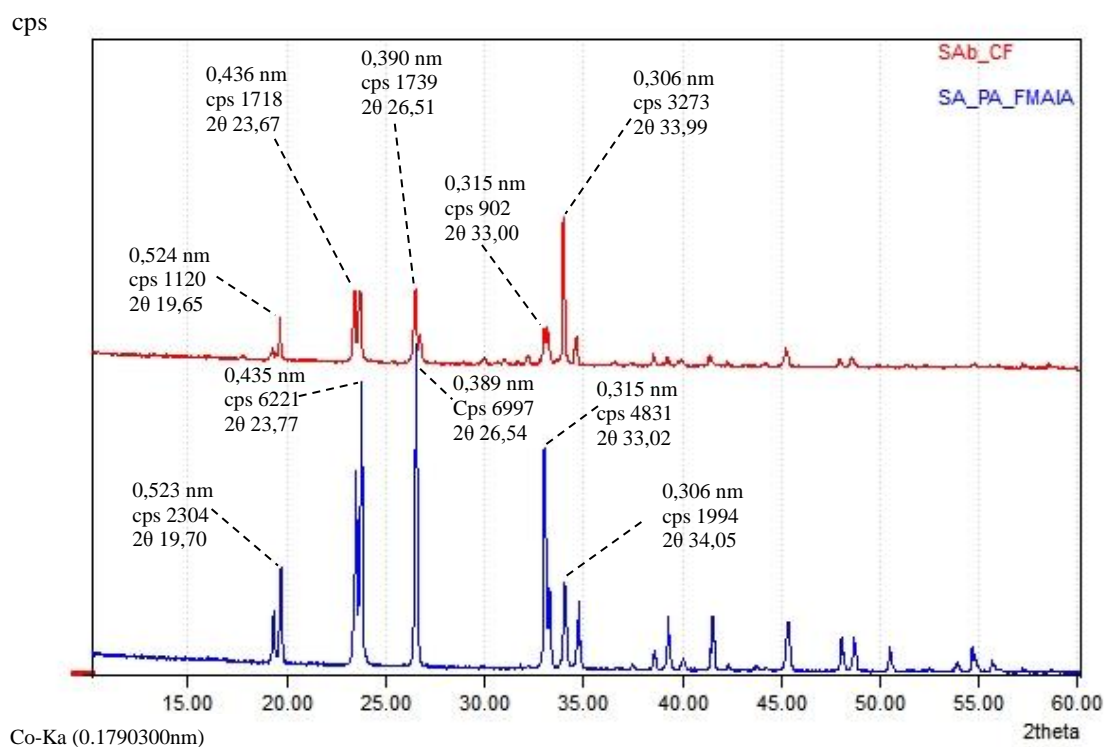


**Figura 20.** Difratogramas de raios X para o sal sintetizado pela amonização da solução mista  $\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$  9 mol  $\text{L}^{-1}$  ( $\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4\text{-CF}$ ),  $\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$  3,57 mol  $\text{L}^{-1}$  ( $\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4\text{b-CF}$ ) e dos reagentes analíticos analítico fosfato monoamônio (MAP-Padrão) e diamônio (DAP-PA) da VETEC<sup>®</sup> e sulfato de amônio (SA-PA) da FMAIA<sup>®</sup>.

Por outro lado, não se descarta a possibilidade do sal produzido ser equivalente àqueles hipotetizados pelas reações nº 5 a 8 (Tabela 1). Essa equivalência fica mais evidente para Tetramônio fosfato sulfato ( $(\text{NH}_4)_4\text{HPO}_4\text{SO}_4$ ) (Reação 8, Tabela 1), considerando-se os teores de N, P e S, mas sobretudo a relação de massa entre N/P+S. Nos sais produzidos pelas soluções 16 a 19 essa relação variou entre 0,82 e 0,80 (Tabela 8), que se aproxima de 0,88, que é esperado para o Tetramônio fosfato sulfato complexo  $(\text{NH}_4)_4\text{HPO}_4\text{SO}_4$  (Tabela 1).

Os sais produzidos pela amonização das soluções nº11 (Tabela 8) com 1,19 mol  $\text{L}^{-1}$  de  $\text{H}_2\text{SO}_4\text{b}$  apresentaram teores de N de 204,90 g  $\text{kg}^{-1}$  e os teores de S foram da ordem de 197,0 g  $\text{kg}^{-1}$ , com relação N/S entre 1,04 (Tabela 8). O pH das soluções preparadas com os sais sintetizados foi de 4,91 (Tabela 8), que podem ser considerados iguais ao pH 5,0 da solução 1 mol  $\text{L}^{-1}$  de  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ . Estes resultados sugerem que a amonização do  $\text{H}_2\text{SO}_4\text{b}$ , de acordo com

a reação nº 4 (Tabela 1), promoveu a síntese do sulfato de amônio biogênico. A hipótese é confirmada com a comparação do difratograma de raio X do sal sintetizadas (SA-CF) com distâncias do plano atômico (0,524; 0,436; 0,390; 0,315; 0,306 nm) análogo com aquele obtido para o reagente analítico  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  (SA-PA) (0,523; 0,435; 0,389; 0,315; 0,306 nm) (Figura 21).



**Figura 21.** Difratogramas de raios X para o sal sintetizado pela amonização da solução de  $\text{H}_2\text{SO}_4$   $1,19 \text{ mol L}^{-1}$  (SAB-CF) e para o reagente analítico  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  (SA-PA) da FMAIA®.

A partir dos picos do reagente analítico (SA-PA) em relação ao sal sintetizado pela amonização da amônia da cama de aviário, observa-se uma boa simetria (similaridade nos valores dos picos) demonstrando que o sal formado foi efetivamente o sulfato de amônio.

## 2.6 CONCLUSÃO

Os estudos mostraram que as soluções podem apresentar concentrações de até 9,0 mol L<sup>-1</sup> de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>; 9,6 mol L<sup>-1</sup> de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e 9,0 mol L<sup>-1</sup> de H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> sem que a capacidade de recuperação da amônia seja comprometida. Toda via, em concentrações inferiores (<4,0 mol L<sup>-1</sup>) não ocorre a cristalização de sais, que pode favorecer a produção de fertilizantes fluidos de pronto uso com a recuperação da amônia.

A partir dos resultados obtidos em bancada laboratorial foi possível constatar que o protótipo desenvolvido teve eficiência no processo de amonificação da cama de aviário e eficiência na amonização dos ácidos utilizados para recuperação da amônia uma vez que a eficiência de amonificação variou de 93 a 100%. Além disso, o protótipo apresenta capacidade para utilização tanto com resíduos sólidos como resíduos líquidos com potencial perda de amônia. Alguns fatores chave devem ser avaliados para potencializar a recuperação de amônia e tornar o processo mais rápido como a avaliação da melhor temperatura de amonificação, fluxo de ar ideal, e períodos de revolvimento da cama de aviário.

Os produtos sintetizados por meio da mistura do ácido sulfúrico com ácido fosfórico podem ser compostos pela mistura de sais de NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> e (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> em fases individuais ou o sal sintetizado pode ser um novo produto com arranjos cristalinos diferentes.

**3 CAPÍTULO II – EVTE: ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DO PROCESSO PARA RECUPERAÇÃO E REUSO DA AMÔNIA DA CAMA DE AVIÁRIO**

### 3.1 RESUMO

O planejamento de inserção de qualquer empresa no mercado deve ser avaliado a fim de garantir a seguridade do investimento realizado para produzir um novo produto ou até mesmo realizar as mudanças necessárias para se estabilizar no mercado. No capítulo 2 realizou-se o estudo de viabilidade técnica e econômica para implantação de uma planta de recuperação de amônia a partir de resíduos industriais e agroindustriais na cidade de Viçosa-MG. Para isso realizou-se o estudo de viabilidade da tecnologia com seus processos produtivos, consumo potencial e logística. Estudo de mercado de aplicação e benchmarking, analisando o tamanho do mercado, potenciais clientes, culturas agrícolas e legislação. Também foi realizado o estudo de concorrentes nas diferentes linhas de produtos desenvolvidos. Realizou-se análise econômico-financeira da planta piloto, avaliando os custos de produção, investimentos iniciais, precificação e fluxo de caixa. Para a produção foi utilizado como resíduo a cama de aviário obtida de avicultores da região, a partir do material processado será obtido fertilizantes fluidos e fertilizante organomineral. O estudo de validação de mercado identificou a potencial aplicação dos produtos no mercado de café, milho e olerícolas na região de Viçosa-MG, sendo entrevistados 17 dos quais 90% utilizam fertilizantes inorgânicos e 50% utilizam fertilizantes orgânicos da própria propriedade. O Produto organomineral apresentou custo de produção de R\$1,96 kg<sup>-1</sup> com valor de venda de R\$2,50 com 20% de margem de lucro, o produto Aqua apresenta um custo de produção de R\$4,05 L<sup>-1</sup> e precificação inicial de R\$16,21 L<sup>-1</sup>. Com processamento no Ano 1 de 82 t mês<sup>-1</sup> de organomineral e 10 m<sup>3</sup> mês<sup>-1</sup> do produto Aqua, estima-se faturamento de R\$4,3 milhões, no Ano 2 com processamento de 107 t mês<sup>-1</sup> de organomineral e 12 m<sup>3</sup> mês<sup>-1</sup> de produto Aqua estima-se faturamento de R\$ 5,4 milhões e no Ano 3 com 129 t mês<sup>-1</sup> de organomineral e 13,6 m<sup>3</sup> mês<sup>-1</sup> de produto Aqua espera-se um faturamento de R\$8,2 milhões. Os indicadores de fluxo de caixa com TMA de 12% indicaram a viabilidade de investimento, sendo esta maior que a taxa SELIC avaliada durante o estudo (2022). Com um TIR (Taxa interna de retorno) de 34% e VPL (Valor presente líquido) de R\$206.045,39 que indicou o potencial ganho de investimento na fábrica e TRC (Breaken even/PayBack) de 1 ano e 11 mês. RBC%, obteve um resultado de 11%, onde a cada R\$1,00 investido é esperado retorno de R\$1,11.

Palavras chaves: Estudo de mercado. Recuperação de Amônia. Investimento.

## ABSTRACT

The planning for insertion of any company into the market must be evaluated in order to guarantee the security of the investment made to produce a new product or even make possible changes to stabilize itself in the market. In chapter 2 we carried out a technical and economic forecast study for the industrial implementation of an ammonia recovery plant from agro-industrial waste in the city of Viçosa-MG. To this end, a study of technology forecasts was carried out with its production processes, potential consumption and logistics. Application market study and benchmarking, analyzing market size, potential customers, agricultural crops and legislation. A study of competitors was also carried out in the different lines of products developed. An economic-financial analysis of the pilot plant was carried out, evaluating production costs, initial investments, pricing and cash flow. For production, poultry litter obtained from poultry farmers in the region was used as extraction. Fluid fertilizers and organomineral fertilizers will be obtained from the processed material. The validation study of market agreements the potential application of products in the coffee, corn and vegetable market in the Viçosa-MG region, 17 of which 90% use inorganic fertilizers and 50% use organic fertilizers from the property itself are discussed. The organomineral product had a production cost of R\$ 1.96 kg<sup>-1</sup> with a sales value of R\$ 2.50 with a 20% profit margin, the Aqua product had a production cost of R\$ 4.05 L<sup>-1</sup> and initial pricing of R\$ 16.21 L<sup>-1</sup>. With processing in Year 1 of 82 t month<sup>-1</sup> of organomineral and 10 m<sup>3</sup> month<sup>-1</sup> of the Aqua product, estimated revenues of R\$4.3 million, in Year 2 with processing of 107 t month<sup>-1</sup> of organomineral and 12 m<sup>3</sup> month<sup>-1</sup> Aqua product, estimated revenue of R\$5.4 million and in year 3 with 129 t month<sup>-1</sup> of organomineral and 13.6 m<sup>3</sup> month<sup>-1</sup> of Aqua product, revenue of R\$8.2 million is expected. The cash flow indicators with a TMA of 12% indicated the investment forecast, which is higher than the SELIC rate evaluated during the study (2022). With an IRR (Internal Rate of Return) of 34% and NPV (Net Present Value) of R\$206,045.39, which indicated the potential gain from investment in the factory and TRC (Breakeven/PayBack) of 1 year and 11 months. RBC%, obtained a result of 11%, where for every R\$1.00 invested, a return of R\$1.11 is expected.

Keywords: Market study. Ammonia Recovery. Investment.

### 3.2 INTRODUÇÃO

Os estudos de viabilidade técnica e econômica (EVTE) são fundamentais para avaliar a viabilidade de um projeto, identificando e avaliando os riscos tecnológicos envolvidos no desenvolvimento do produto. Além disso, compreende a estrutura do mercado em que a tecnologia será inserida, avaliando se o investimento financeiro do projeto resultará em lucros satisfatórios para os investidores. Este estudo fornece informações estratégicas importantes para orientar decisões sobre as potencialidades e as perspectivas tecnológicas, mercadológicas e econômico-financeiras do projeto.

Os estudos realizados no capítulo 1 deste trabalho evidenciaram a viabilidade dos processos para a aplicação tecnológica na recuperação da  $\text{NH}_3$  perdida da cama de aviário, com a produção de soluções com características de matérias-primas para fertilizantes fluidos e o aproveitamento da cama de aviário compostada para a produção de fertilizantes organominerais. Esta tecnologia tem um forte apelo ambiental, pois ajuda a mitigar os efeitos das emissões de  $\text{NH}_3$  na atmosfera, e é adequada ao conceito de economia circular, pois proporciona o aproveitamento integral de um importante resíduo da atividade agropecuária.

Neste capítulo, será apresentado o EVTE para esta tecnologia, tomando-se por base uma unidade piloto com duas linhas de produção: a Aqua e a Organo sediada na cidade de Viçosa estado de Minas Gerais. O EVTE servirá para avaliar a viabilidade técnica e econômica dessas linhas de produção, identificando os riscos envolvidos, as oportunidades de mercado e a capacidade de geração de lucros do projeto. Essas informações serão essenciais para orientar as decisões sobre a implementação do projeto e para garantir o sucesso do empreendimento. Adicionalmente apresentaremos a tecnologia proposta para a planta, acompanhada de indicadores de viabilidade econômica e análise estratégica de mercado. Isso incluirá uma descrição detalhada dos processos envolvidos, os recursos necessários e os custos associados, bem como uma análise das oportunidades e desafios que o mercado apresenta. Essas informações serão cruciais para entender a viabilidade do projeto e para tomar decisões informadas sobre sua implementação.

### **3.1 OBJETIVOS**

#### **3.1.1 Objetivos geral**

Avaliar a viabilidade econômica da implementação de uma planta piloto para a produção de fertilizantes organominerais em Viçosa, Minas Gerais, considerando duas linhas de produção distintas: Aqua e Organo.

#### **3.1.2 Objetivo específicos**

Realizar o levantamento dos custos de implantação e viabilidade tecnológica de uma planta com duas linhas de produção: Aqua (fertilizantes líquidos – FA) e Organo (fertilizantes organo minerais sólidos – FOS) a partir da de recuperação e reuso da amônia da cama de aviário.

Analisar a viabilidade econômica utilizando os indicadores Valor Presente Líquido (VPL), Tempo de Retorno do Capital Descontado (TRC%), Taxa Interna de Retorno (TIR) e Razão Benefício/Custo Descontado (RBC%), Análise Swot, Análise dos concorrentes, Análise dos Clientes (Linha Aqua – B2B), Análise de fornecedores/parceiros.

### **3.2 JUSTIFICATIVA**

O estudo de viabilidade técnica e econômica (EVTE) é uma etapa crucial para o início de novos empreendimentos, incluindo a proposta tecnológica abordada neste trabalho. A aplicação desta tecnologia específica é essencial para validar a viabilidade e o potencial futuro da recuperação e reuso da amônia proveniente da cama de aviário. A realização desses estudos desempenha um papel fundamental na tomada de decisão sobre o investimento em uma instalação de planta piloto e futuras filiais. Assim, este estudo se revela indispensável para mitigar os riscos associados à implementação do projeto de recuperação e reuso da amônia da cama de aviário na cidade de Viçosa - MG.

### **3.3 REVISÃO DE LITERATURA**

#### **3.3.1 Mercados de Fertilizantes Fluidos**

Os fertilizantes fluidos são soluções ou suspensões de nutrientes em água ou outros líquidos, que se caracterizam pela facilidade de manipulação, transporte, armazenamento e aplicação na lavoura (Bichara, 1994). Segundo Otto (2019), esses fertilizantes apresentam como principal vantagem a rápida absorção dos nutrientes pelas plantas, devido à sua forma líquida.

O estado de Minas Gerais também se destaca nesse mercado, sendo detentor de 47 das empresas espalhadas por todo o estado, algo representativo se levar em consideração que quase 50% das empresas estão no estado de São Paulo (ABISOLO, 2020). Ou seja, Minas é o segundo estado com mais empresas de tecnologia de nutrição vegetal. Tornando-se um cenário favorável para o nosso produto, que será comercializado para outras empresas.

O mercado de fluidos teve um faturamento de 7,6 bilhões de reais no ano de 2020, o que representou um crescimento de 31% em relação ao ano anterior. Além disso, atualmente estão distribuídas cerca de 526 empresas do ramo ao longo do território nacional (ABISOLO, 2020).

#### **3.3.2 Mercado de fertilizantes Organominerais**

De acordo com o Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA), fertilizante organomineral é definido como: "Fertilizante formulado com nutrientes minerais (naturais ou sintéticos) e compostos de material orgânico, de origem natural ou obtidos a partir de processo de subprodutos agroindústrias, rurais ou urbanos". Outra definição de organominerais (ABISOLO), define fertilizante organomineral como: "Fertilizante que apresenta em sua composição, no mínimo, 20% de material orgânico". Esta definição é mais restrita, pois exige que o fertilizante organomineral contenha pelo menos 20% de material orgânico. No entanto, ela também abrange os produtos obtidos pelo processo proposto, que geralmente apresentam teores de material orgânico superiores a 20%.

Apesar da grande diversidade de produtos que podem ser utilizados na fração orgânica da mistura, a maioria são de origem animal (56.6%) ou resíduos da agroindústria (24.3%). Isso está relacionado com a grande disponibilidade de produtos ao longo de todo território e da capacidade de agregar características benéficas ao material. No ano de 2020, esse mercado teve um crescimento surpreendente de 80.5%, mesmo em meio a pandemia, totalizando um faturamento de R\$ 1,96 bilhões (ABISOLO, 2020). Fato é que este mercado tem uma alta

dependência do mercado externo, devido à necessidade de importação das matérias-primas, isso refletiu nos custos de produção com um aumento de 20%. Enquanto isso, o preço final dos produtos subiu apenas 15,1% nas prateleiras, não acompanhando o aumento do custo.

Segundo Silva, (Silva e Silva, 2023), a matéria-prima representa 76,2% do custo final do produto, representando a maior fatia dos custos. Devido a esse aumento, o número de empresas no ramo vem diminuindo e hoje totalizam 79 ao longo de todo território nacional. O alto custo da matéria-prima se resume basicamente aos fertilizantes minerais utilizados na mistura, já que a parte orgânica na maioria das vezes é oriunda de resíduos e representa um baixo custo na fração da matéria-prima.

O estado de Minas Gerais é o segundo maior consumidor de organominerais do país, representando um total de 22,65%, ficando atrás apenas do estado de São Paulo. O alto consumo no estado reflete a alta produção de culturas que demandam desse produto, como o café, além de refletir na alta disponibilidade de material orgânico no mercado para formação desses produtos. Minas Gerais se destaca por ser um estado com potencial de mercado para esses produtos, já que apenas 12% das empresas nacionais se encontram no estado (ABISOLO, 2020)

### **3.3.3 Produção avícola**

A tecnologia consiste na utilização da cama de aviário para obtenção de seus dois produtos, o organomineral é formulado com a parte sólida oriunda da compostagem da cama e os produtos matéria-prima de fertilizantes fluidos são obtidos a partir da captura da amônia volatilizada também da cama de aviário. Ou seja, a cama de aviário e consequente produção avícola no Brasil está diretamente relacionada com a inovação.

O Brasil detém um enorme rebanho de aves e abate aproximadamente 6,2 bilhões de aves de corte por ano (IBGE, 2021), o que representa um total de 12,4 bilhões de toneladas de cama de frango. A produção avícola brasileira se encontra adensada junto às principais áreas produtoras de grãos, por isso a região representa 28,2% da produção nacional e o estado de Minas Gerais 7,31%, o que representa quase um bilhão de toneladas de cama de franco, produzida anualmente no estado.

### **3.3.4 Mercado do café**

O Brasil é o maior produtor mundial de café, só no ano de 2022 foram produzidas cerca de 55,74 milhões de sacas beneficiadas e um total de 2,23 milhões de hectares plantados, esses números apenas para o café arábica (CONAB, 2022). O café se adaptou tão bem às terras

brasileiras devido a vários motivos, como o clima, vegetação nativa, altitude e os tipos de solo aqui presentes. Ao longo dos anos essa adaptação foi se tornando ainda melhor devido aos estudos realizados pelas instituições brasileiras que buscam aumentar ainda mais a produtividade.

O estado de Minas Gerais representa muito bem as condições que permitiram o sucesso da cultura no país, o estado é o maior produtor de café do Brasil e também é responsável pela maior área plantada de café arábica do país, correspondendo a 70%. No ano de 2022 foram plantados 1,32 milhões hectares e produzidos cerca de 26,7 milhões de sacas (CONAB, 2022). A região da Zona da Mata, macrorregião do estado, também se destaca na produção de cafés, principalmente pelas condições favoráveis que a região apresenta para o cultivo. Em 2022 foram produzidos cerca de 7,4 milhões de sacas em 289,1 mil hectares, representando uma fatia de cerca de 25% da produção total do estado (CONAB, 2022)

A microrregião de Viçosa, localizada na Zona da Mata mineira, é reconhecida mundialmente pela produção de cafés especiais de excelente bebida, o que garante um alto valor agregado a esses produtos (CONAB, 2023).

Na região estão localizadas cidades como Araponga, Canaã e Ervália, que produzem café a nível de exportação e demandam produtos similares aos quais propõe produzir. A microrregião é responsável por uma produção de cerca de 424,5 mil sacas em pouco mais de 19 mil hectares plantados (CONAB, 2023).

## **3.4 METODOLOGIA**

### **3.4.1 Procedimento metodológicos**

Como parte do procedimento metodológico, realizou-se um levantamento detalhado de precificação da instalação da planta, considerando os gastos necessários para a implantação na cidade de Viçosa, Minas Gerais. Esse levantamento incluiu uma análise dos custos envolvidos na instalação, levando em consideração o raio de atuação da coleta da matéria-prima, que abrange uma área de 100 km. Essa abrangência permite o acesso a fontes de matéria-prima e torna a logística viável para a empresa (DENG, 2019).

Adicionalmente, a precificação do produto foi realizada levando em conta os produtos concorrentes no mercado. Esse aspecto é crucial para garantir uma oferta competitiva no mercado e para fornecer insights valiosos após a avaliação junto aos potenciais clientes, que incluem tanto os produtores que poderão ser clientes diretos quanto os produtores que fornecerão a matéria-prima, com possibilidade de estabelecer acordos de fornecimento (GIBSON, 2017). Essa abordagem permite uma análise abrangente dos aspectos financeiros e estratégicos relacionados à implantação da planta, contribuindo para a formulação de estratégias eficazes de mercado e para a viabilidade do empreendimento como um todo.

### **3.4.2 Tecnologia proposta**

A tecnologia proposta, baseou-se em estudos laboratoriais validados no capítulo 1 deste trabalho, busca atender às demandas dos produtores da região da zona da mata mineira, enquanto também considera os objetivos de viabilidade para instalação da planta piloto. A tecnologia proposta foi avaliada por profissionais e centros de tecnologia e inovação, com foco em sua potencialidade de desenvolvimento de forma escalonável, levando em consideração as demandas e peculiaridades do mercado local.

### **3.4.3 Fluxo de Caixa de Investimento e Orçamentação**

O fluxo de caixa é um conceito fundamental na gestão financeira de uma empresa. Segundo Branson (2015), fluxo de caixa é a alma de um negócio e a fonte primária de força financeira. Em outras palavras, é o movimento do dinheiro que entra e sai da empresa durante um determinado período de tempo. Isso inclui todas as receitas e despesas, como vendas de produtos ou serviços, pagamento de fornecedores, salários de funcionários, entre outros. É importante ressaltar que o fluxo de caixa não se trata apenas do lucro líquido de uma empresa,

mas sim de todas as movimentações financeiras que ocorrem, permitindo uma visão mais ampla da saúde financeira da organização. Além disso, o fluxo de caixa também é uma ferramenta valiosa para prever e planejar o futuro financeiro de uma empresa. Segundo Peter Drucker (2016), fluxo de caixa é a medida mais importante de sucesso para uma empresa. Isso significa que, sem um fluxo saudável, uma empresa pode enfrentar dificuldades para pagar suas contas, investir em novos projetos ou até mesmo sobreviver em momentos de crise. Portanto, a gestão eficaz do fluxo de caixa é crucial para o sucesso e a sustentabilidade de qualquer negócio.

### 3.4.4 Indicadores de Viabilidade Econômica e Financeira de Projetos

O objetivo de elaboração do fluxo de caixa é permitir a avaliação de viabilidade econômica e financeira do projeto em questão. Essa avaliação é feita utilizando os indicadores de viabilidade financeira: Tempo de Retorno de Capital Descontado (TRC%), Valor Presente Líquido (VPL%), Taxa Interna de Retorno (TIR) e Razão Benefício/Custo Descontado (RBC%), Análise swot, Análise dos Concorrentes, Análise dos Clientes, Análise de fornecedores/parceiros e Análise econômico-Financeira da planta piloto.

#### 3.4.4.1 Tempo de Retorno do Capital Descontado (TRC%)

O conceito de Taxa de Retorno sobre o Capital Investido (TRC%) ou Payback Descontado, é fundamentalmente o período de tempo necessário para que o fluxo de caixa se iguale a zero, levando em consideração a taxa de juros presente em cada ano do fluxo de caixa (NOGUEIRA, 2011). Este indicador revela o tempo estimado para recuperar integralmente o capital investido em um determinado projeto.

O TRC% é um importante indicador de liquidez do projeto, pois quanto menor for esse valor, mais rápida será a recuperação do capital investido e, portanto, maior será a liquidez do projeto (BRUNI et al., 1998).

A fórmula para calcular o TRC% é descrita pela seguinte equação (ROZENFELD et al., 2015):

$$TRC\% = \frac{|FCCD_{j-}|}{(|FCCD_{j-}| + |FCCD_{j+}|)} \times (Ano_+ - Ano_-) + Ano_-$$

onde:

TRC% = Tempo de Retorno do Capital Descontado;

FCCD<sub>j-</sub> = último fluxo de caixa acumulado descontado negativo;

FCCD<sub>j+</sub> = primeiro fluxo de caixa acumulado descontado positivo;

Ano<sub>+</sub> = período do primeiro fluxo de caixa acumulado descontado positivo;

Ano<sub>-</sub> = período do último fluxo de caixa acumulado descontado negativo

O TRC% apresenta uma vantagem significativa ao ser utilizado como indicador de liquidez do projeto, pois não apenas considera essa perspectiva, mas também leva em conta a variação do valor da moeda ao longo do tempo. Essa correção monetária é realizada por meio da aplicação de uma taxa de juros constante em cada ano do fluxo de caixa, resultando em uma estimativa mais próxima do valor real do projeto (BRUNI et al., 1998).

No entanto, é importante destacar algumas desvantagens do TRC%. Primeiramente, este indicador não é um parâmetro direto de rentabilidade, não fornecendo uma análise abrangente nesse sentido. Além disso, o TRC% não considera todo o período de vida do projeto, o que pode limitar sua capacidade de avaliar a efetividade do investimento em longo prazo. Por fim, as taxas de juros utilizadas no cálculo são determinadas antes da execução do empreendimento, o que significa que não há garantia de que essas taxas permaneçam constantes no futuro, podendo afetar a precisão das projeções financeiras (NORONHA, 1987).

#### 3.4.4.2 Valor Presente Líquido (VPL%)

O Valor Presente Líquido Percentual (VPL%) é calculado como a soma do fluxo de caixa, descontando a taxa de juros em cada ano do projeto (ADAMI, 2020). Um VPL% positivo indica que o projeto rendeu mais do que a taxa de juros oferecida pelo mercado financeiro, demonstrando sua viabilidade. Por outro lado, um VPL% negativo sugere que o capital investido no projeto teria uma rentabilidade superior se aplicado à taxa de juros do mercado financeiro, tornando o projeto considerado inviável.

A fórmula para calcular o VPL% é a seguinte (ADAMI, 2020):

$$VPL\% = \sum_{t=0}^T \frac{FC_t}{(1 + \rho)^t}$$

onde:

VPL% = Valor Presente Líquido (R\$);

$FC_t$  = fluxo líquido do fluxo de caixa (R\$);

$\rho$  = taxa de juros;

t = período do fluxo de caixa.

Entre as vantagens do VPL%, destaca-se o fato de que esse indicador abrange todo o período de realização do investimento e leva em conta a variação do valor da moeda ao longo do tempo (WOILER, 1983).

No entanto, as desvantagens do VPL% incluem a incerteza em relação à estabilidade da taxa de juros utilizada nos cálculos ao longo do período de investimento, uma vez que essa taxa é previamente determinada. Além disso, a divergência nas taxas de juros empregadas em diferentes projetos dificulta a comparação entre eles. Adicionalmente, o VPL% não é eficaz na comparação de projetos com escalas diferentes, já que tende a aumentar com o aumento da escala do projeto (INCO, 2022).

### 3.4.4.3 Taxa Interna de Retorno (TIR)

Na análise financeira de projetos, a Taxa Interna de Retorno (TIR) é definida como a taxa de juros na qual o Valor Presente Líquido Percentual (VPL%) se iguala a zero (ADAMI, 2020). Portanto, para que um projeto seja considerado economicamente viável, a TIR deve exceder a taxa de juros praticada pelo mercado financeiro.

O cálculo da TIR é realizado através da seguinte equação (ADAMI, 2020):

$$\sum_{t=0}^T \frac{FC_t}{(1 + \rho^*)^t} = 0$$

onde:

$FC_t$  = fluxo líquido do fluxo de caixa (R\$);

$\rho^*$  = taxa de juros que iguala o VPL% a zero (TIR);

t = período do fluxo de caixa.

As vantagens da Taxa Interna de Retorno (TIR) são diversas e fundamentais para a análise de projetos de investimento. Este indicador apresenta as seguintes vantagens: considera o fluxo de caixa ao longo de todo o horizonte de investimento, levando em conta o valor do capital investido com o passar do tempo; não se baseia em uma taxa de juros pré-determinada para os cálculos, o que aumenta sua flexibilidade e adaptabilidade a diferentes cenários; sua

interpretação é facilitada, bastando comparar o resultado com a taxa de juros vigente no mercado financeiro; além disso, permite a comparação da rentabilidade entre projetos com diferentes horizontes de investimento, pois expressa a rentabilidade por período (WOILER, 1983).

Por outro lado, uma desvantagem da TIR é o seu elevado grau de complexidade no cálculo, o que pode representar um desafio para analistas financeiros e gestores de projetos (WOILER, 1983).

#### 3.4.4.4 Relação Benefício-Custo Descontado (RBC%)

A Taxa de Retorno sobre o Capital (RBC%) avalia o retorno que cada real investido proporciona ao investidor ao longo da duração do projeto. Para calcular a RBC%, é necessário dividir o somatório dos valores positivos do fluxo de caixa descontado pelo somatório dos valores negativos do mesmo fluxo de caixa descontado do projeto (NOGUEIRA, 2011). Se o valor da RBC% for inferior a um, o projeto é considerado economicamente inviável, indicando que a soma dos valores positivos do fluxo de caixa descontado é menor do que a soma dos valores negativos.

A fórmula para calcular a RBC% é a seguinte (SAMANEZ, 2010):

$$RBC\% = \frac{\frac{\sum RA}{(1+i)^t}}{\frac{\sum DA}{(1+i)^t}}$$

onde:

RBC% = Relação Benefício-Custo Descontado;

RA = receita acumulada;

DA = despesa acumulada;

i = taxa de juros;

t = período do fluxo de caixa.

As vantagens da Taxa de Retorno sobre o Capital (RBC%) incluem o fato de que esse indicador considera o fluxo de caixa ao longo de todo o período do projeto e leva em conta o valor do capital investido conforme os anos passam (SAMANEZ, 2010).

No entanto, uma desvantagem da RBC% é que, como a taxa de juros é previamente escolhida para os cálculos, não há garantia de que esse valor se manterá constante ao longo de todo o horizonte de investimento (WOILER, 1983).

#### **3.4.4.5 Análise swot**

A análise SWOT é uma ferramenta essencial que destaca os pontos fortes e fracos do empreendimento, proporcionando insights valiosos para sua gestão estratégica.

Entre os pontos fortes da planta, destacam-se seus diferenciais significativos em relação às outras propostas do mercado (SOUZA, 2018). Isso não apenas pode garantir nichos de mercado específicos, mas também assegura uma alta competitividade do produto. O uso de matéria-prima de origem biológica é outro destaque, oferecendo uma vantagem sobre matérias-primas minerais finitas, como o fósforo (NOGUEIRA, 2017). A natureza biológica da matéria-prima garante uma renovação constante do estoque, alinhando-se com os princípios da economia circular, base da operação da startup (LEE, 2020).

#### **3.4.4.6 Análise dos Concorrentes**

As análises de concorrentes foram realizadas por meio de buscas na plataforma SIPERAGRO (MAPA, 2022) do site do Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento e anuário da associação brasileira de indústrias de tecnologia em nutrição vegetal (ABISOLO, 2020). Para isso levou em consideração as características dos teores nutricionais dos produtos e as fontes de matéria-prima que utilizavam na fabricação.

#### **3.4.4.7 Análise de mercado (Linha Organo – B2C)**

A análise com potenciais clientes da linha Organo em parceria com a EMATER-MG, foi realizada por meio de visitas, conversas e aplicação de questionários (Anexo). Foram realizadas entrevistas com 6 produtores de café da região de Araponga-MG, dos quais 2 produziam cafés de forma tradicional (mercado focado principalmente na produtividade) e 4 produziam cafés especiais (mercado específico focado na qualidade do fruto – pós colheita) e 11 produtores da região de Cajuri e Viçosa – MG, com cultivo de milho, feijão, café e olerícolas (horticultura) descrito no formulário anexo1.

#### **3.4.4.8 Análise de mercado (Linha Aqua – B2B)**

Para análise de mercado da linha Aqua, também foram aplicados questionários com empresas de fertilizantes, potenciais clientes das nossas soluções/sais (anexo 2). Foram realizadas pesquisas com 6 empresas: AgroCP, Agrichem, Floema, Riga, Multitécnica e BeG. As empresas entrevistadas atendem o mercado de macro e micronutrientes e também de fertilizantes especiais (fertilizantes foliares).

#### **3.4.4.9 Análise de fornecedores/parceiros**

Realizou-se o levantamento de possíveis fornecedores de matéria prima próximo a região de Viçosa. Estima-se um potencial de aproximadamente 4,0 mil toneladas de cama de frango produzidas na região de Viçosa, considerando o ciclo de 45 dias de produção. A região mineira abrange as cidades de Cajuri, Pedra do Anta, Paula Cândido, Porto Firme, Teixeiras e Viçosa, com uma produção média de 1,7 milhões de aves.

### 3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.5.1 Tecnologia proposta

Composta por duas linhas de produção (fidura 1), a primeira, denominada Linha Aqua, inicia com o armazenamento da cama de frango proveniente dos aviários locais em um pátio de matéria-prima. Posteriormente, por meio de um sistema de compostagem, de cama de frango são processadas para obtenção de gás amônia (NH<sub>3</sub>).

A segunda linha, denominada Linha Organo, visa a produção de fertilizantes orgânicos a partir da cama de frango. Após a compostagem da cama a matéria orgânica é direcionada para produção de fertilizantes orgânicos com valor econômico considerável devido a demanda pelos produtores de café e horticultura, havendo saída para produto totalmente orgânico.

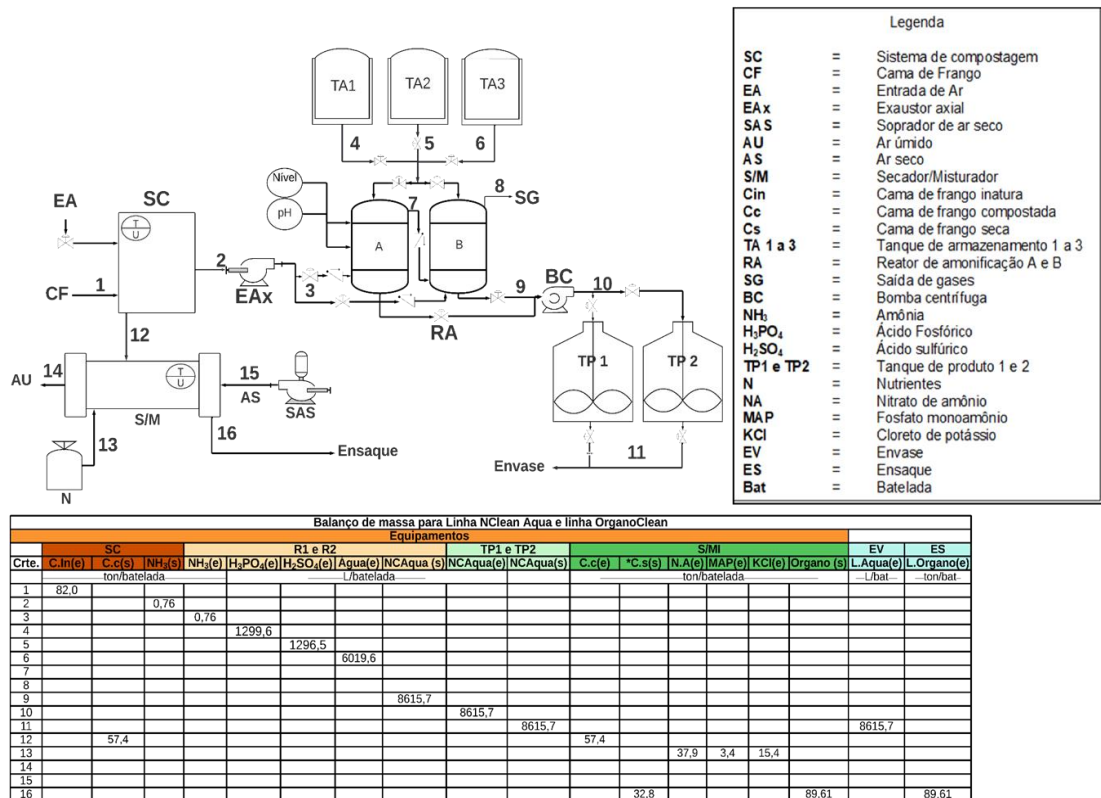


Figura 22 Balanço de massa do produtos fluídos e orgânicos

##### 3.5.1.1 Linha Aqua

Inicialmente, a cama de frango proveniente dos aviários será armazenada em um pátio de matéria-prima. Por meio de pá de bico, a cama será adicionada ao sistema de compostagem (corrente 1). Nessa etapa serão processadas, em batelada, 82 toneladas de cama de frango, para obtenção do gás amônia (NH<sub>3</sub>) em condições normais de temperatura (ambiente). Por meio de

um soprador de ar (SA – exaustor axial), o gás produzido nas câmaras de compostagem (corrente 2), rico em amônia, alimentará os reatores de neutralização pela base do equipamento (corrente 3). O controle da vazão do gás será realizado por meio da abertura e fechamento (manual) da entrada de ar no sistema de compostagem, de forma a criar pressão negativa, o que contribuirá na desorção da amônia gasosa da cama. O gás, rico em amônia, alimenta o reator de neutralização pela base, é disperso passa por uma coluna de solução ácida. O contato das bolhas de gás contendo amônia em sua composição com a solução ácida, faz com que ocorra a reação química de neutralização em condições normais de temperatura e pressão. Na tecnologia estão previstas a utilização de duas soluções ácidas (sulfúrico e fosfórico) (corrente 4 e 5) diluídas em água (corrente 6). As concentrações de  $2,0 \text{ mol L}^{-1}$  de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  +  $2,0 \text{ mol L}^{-1}$  de  $\text{H}_3\text{PO}_4$  das soluções dos ácidos contidas nos tanques de armazenamento garantem os teores de 9,0 % de N, 5,0 % de P e 6,0 % de S no produto Aqua NPS para atender a demanda dos produtores de café e de milho de Viçosa-MG e região.

Na configuração da planta, estão previstos dois reatores (Ra e Rb) de lavagem de gás do tipo drechsel que podem trabalhar em série (o gás passa obrigatoriamente primeiro no reator 1 e em sequência no reator 2) ou isolado (o gás passa em apenas um reator e é dispersado na atmosfera). Este procedimento será controlado por meio de manobra (manual) de válvulas antes do início do processamento. O final da reação será controlado por meio de monitoramento do pH. Para isso será considerado o valor de pH 7,8.

Quando o valor de pH do produto alcançar a faixa requerida, por meio de manobra de válvulas (manual), a corrente de gás será desviada para o reator em espera (se estiver trabalhando de forma isolada – apenas 1), o qual já estará carregado com solução do ácido para início de uma nova batelada. O produto do reator que estava em operação será adicionado aos tanques de armazenamento da linha Aqua (crte 10). Quando completar a quantidade de produto pré-estabelecida, o conteúdo do tanque será homogeneizado com o auxílio de agitadores de topo e amostrado para análise de controle qualidade. Até que isso ocorra, o produto será armazenado em tambores de 50L e serão armazenados ( crte 11) em local seco e fresco.

Para o balanço de massa (L batelada<sup>-1</sup>) do processo estima-se que a partir de 82 t.batelada<sup>-1</sup> de cama de aviário seja obtido 766 kg de  $\text{NH}_3$ , necessitando aproximadamente de 6019,6 L de água, 1299,6 L de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  e 1299,6 L de  $\text{H}_3\text{PO}_4$  totalizando 8615,7 L de produto Aqua NPS por batelada. Vale ressaltar que a quantidade de amônia pode variar com o número de ciclos que a cama foi submetida ao longo da produção na granja, podendo chegar até 6 ciclos anuais, uma média de 45 dias por ciclo.

### 3.5.1.2 Linha Organo

Após o processamento da cama de aviário, obtendo um subproduto com baixo teor de volatilização de amônia, a mesma será processada para obtenção de fertilizantes sólidos, com adição de nutrientes, na segunda linha da tecnologia. O Organo – fertilizantes organomineral – será obtido após a etapa de compostagem realizado para a produção da linha “Aqua”. O resíduo intermediário já compostado será analisado para verificar os teores de nutrientes, e, posteriormente, será transferido para secador/misturador (corrente 12), permanecendo até o resíduo atingir menos de 10% de umidade). O misturador possuirá capacidade de 2000 kg de material/batelada. Será adicionado como fonte mineral os fertilizantes 37,9 t de nitrato de amônio (NA), 3,4 t de fosfato monoamônio (MAP) e 15,4 t de cloreto de potássio (KCl) (corrente 13). A mistura do Organo é realizada até que fique omogênea e com máximo de 20% de umidade ao final do processamento, logo será obtido um total de 89,6 t de fertilizante organomineral por batelada.

Após o processo de mistura e secagem, o Organo será embalado em sacarias de 50kg. Conforme a demanda do cliente, o Organo poderá ser comercializado a granel, sendo apenas retirado do galpão de armazenamento e transferido direto para expedição.

### 3.5.1.3 Consumo potencial

Para facilitar a o potencial produtivo da planta piloto, realizou-se os cálculos de produção a partir de 100 toneladas de cama de aviário. Estima-se que para cada 100 t de cama de aviário utilizada é possível obter as seguintes quantidades de cada produto da linha Aqua e Organo conforme tabela 9 e 10.

**Tabela 9.** Balanço de massa Linha Aqua NPS (09-05-06)

Produto	Cama	NH <sub>3</sub>	Água	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Total
Aqua-NPS	t.batelada <sup>-1</sup>	kg.batelada <sup>-1</sup>	L.batelada <sup>-1</sup>			
	100	935,0	7340,9	1584,8	1581,1	10507

**Tabela 10.** Balanço de massa linha Organo (14-02-10)

Produtos	Cama (Compostagem)	Cama (Processada)	NA	MAP	KCl	Produção
Organo	t batelada <sup>-1</sup>					
	100	40	46,2	4,2	18,8	109,2

#### **3.5.1.4 Geração de resíduos**

O processo de produção não gera resíduos, pois as matérias-primas utilizadas (cama de aviário e ácidos) são utilizadas nos processos de produção dos fertilizantes com máxima eficiência tanto para obtenção da linha Aqua como linha Organo. O processo de obtenção dos produtos da linha Aqua garantem uma eficiência de síntese de 95 – 99%.

#### **3.5.1.5 Logísticas**

A logística requer uma divisão em duas linhas distintas de processamento e comercialização: a linha Aqua e a linha Organo.

Na linha Aqua, é essencial contar com um veículo dedicado ao transporte dos insumos necessários para a restauração do ácido e à coleta do fertilizante produzido ao longo de um período de 15 dias. Posteriormente, esse fluido deve ser encaminhado para a planta de preparo, onde serão realizadas análises químicas do fertilizante e físicas, posteriormente serão envasados para comercialização. O produto final será então distribuído para comércio agrícola (revendas e lojas agropecuárias) e vendas diretas aos produtores.

Por outro lado, na linha orgânica, é crucial dispor de uma ensacadora para embalar e pesar o material que foi utilizado para obtenção da linha Aqua, deixando-o pronto para ser enviado ao comércio local.

### **3.5.2 Fluxo de Caixa de Investimento e Orçamento**

#### **3.5.2.1 Investimentos iniciais**

O investimento inicial foi discriminado na tabela 11, onde é apresentado a discriminação do *capital expenditure*, despesa de capital em português (CAPEX). As despesas de capital, ou CAPEX, são investimentos financeiros realizados por uma empresa ou organização para adquirir, manter ou melhorar ativos físicos, como equipamentos, propriedades, infraestrutura ou tecnologia, com o objetivo de gerar benefícios de longo prazo. Esses investimentos geralmente são feitos com a intenção de gerar benefícios de longo prazo, como aumento da capacidade produtiva, melhoria da eficiência operacional ou expansão do negócio. Os gastos de capital geralmente são amortizados ao longo do tempo, refletindo a depreciação ou o uso dos ativos adquiridos (Brigham & Ehrhardt, 2013). Inicialmente, o custo mais elevado fica atrelado aos equipamentos de processamento da cama de aviário visto que é necessário realizar o procedimento com menor espaço de tempo e manter a umidade na faixa ideal ( até 20%) conforme a legislação em vigor do MAPA.

**Tabela 11.** Discriminação das despesas de capital (CAPEX) – ANO 1

Item de despesa	Preço
<b>Infraestrutura básica</b>	
Construção civil	R\$ 100.000,00
Mobília e afins	R\$ 30.000,00
<b>Total</b>	<b>R\$ 130.000,00</b>
<b>Infraestrutura técnica</b>	
Computadores e periféricos	R\$ 10.000,00
Cameras de vigilância	R\$ 7.000,00
Sistema de compostagem	R\$ 350.000,00
Misturador/secador	R\$ 135.000,00
Lavador de gases	R\$ 25.000,00
Envase	R\$ 20.000,00
Tanques de armazenamento	R\$ 15.100,00
Enleirador e raspador	R\$ 2.500,00
<b>Total</b>	<b>R\$ 564.600,00</b>
<b>CAPEX</b>	<b>R\$ 694.600,00</b>

### 3.5.2.2 Demais investimentos

No tabela 12 esta discriminado os *operational expenditure*, ou seja, gastos relacionados ao operacional (OPEX), referente a produção do ANO 1 da planta piloto. OPEX são as despesas operacionais atrelados a gastos recorrentes e necessários para manter as operações diárias de uma empresa, como salários, aluguel, contas de água e luz, suprimentos de escritório, entre outros. Esses custos são essenciais para manter a empresa em funcionamento e são considerados no planejamento financeiro de curto prazo (Brigham & Ehrhardt, 2013). Neste sentido, observou-se que os custos com maior impacto financeiro esta nas matérias primas para produção dos fertilizantes. Estes dados deixam claro que um dos pontos de fragilidade e de maior atenção é a dependencia de materia prima importada.

**Tabela 12.** Discriminação das despesas operacionais OPEX – ANO 1

DESPESAS DA PRODUÇÃO	Preço
<b>Gastos Ligados a solução</b>	
Frete da cama de frango	R\$ 6.601,00
Cama de frango	R\$ 17.169,20
Ácido Fosfórico	R\$ 14.390,46
Ácido Sulfúrico	R\$ 20.497,69
MAP	R\$ 13.499,91
Cloreto de potássio	R\$ 44.921,24
Nitrato de amônia	R\$ 96.679,97
Água	R\$ 32,56
<b>Total</b>	<b>R\$ 213.792,04</b>
<b>Gasto pessoal</b>	
Equipe – Administrativo	R\$ 24.000,00
Operacional	R\$ 12.000,00
Comercial e Marketing	R\$ 8.000,00
<b>Total</b>	<b>R\$ 44.000,00</b>

**Tabela 12.** Discriminação das despesas operacionais (OPEX) – ANO 1 (continuação)

DESPESAS GERAIS	Preço
<b>Despesas com vendas</b>	
Propaganda de TV	R\$ 2.800,00
Mídias sociais e Inbound	R\$ 500,00
Outbound Marketing	R\$ 1.000,00
Viagens	R\$ 2.000,00
Aluguel de veículo empresarial	R\$ 9.000,00
Combustível	R\$ 3.000,00
Impostos	R\$ 18.163,93
<b>Total</b>	<b>R\$ 36.463,60</b>
<b>Despesas Administrativas</b>	
Aluguel espaço	R\$ 5.000,00
Internet	R\$ 100,00
Telefone	R\$ 60,00
Luz	R\$ 3.000,00
Água	R\$ 600,00
Materiais de escritório	R\$ 300,00
Contabilidade	R\$ 650,00
Capacitação	R\$ 1.000,00
<b>Total</b>	<b>R\$ 10.710,00</b>
<b>Total das despesas Gerais</b>	<b>R\$ 47.173,60</b>
<b>Total OPEX</b>	<b>R\$304.965,64</b>

### 3.5.2.3 Custos fixos e Variáveis

Para determinação dos custos fixos considerou-se a despesas gerais + custo pessoal (tabela 12). Para determinação dos custos variáveis considerou-se os gastos ligados a produção (tabela 12).

Custos fixos/mês	=	R\$ 91.000,00
Custos variáveis/mês	=	R\$ 213.792,02
Valor total /mês	=	R\$ 304.965,64

### 3.5.2.4 Precificação

Para a precificação do produto obtido na linha Organo considerou-se os valores de mercado encontrados em produtos similares por meio de pesquisas. Assim com um custo de

produção de R\$1996,20 t<sup>-1</sup> o produto Organo foi precificado em R\$2495,25 t<sup>-1</sup>, uma margem de 20%.

Para a definição da precificação do produto obtido pela linha Aqua, não foi possível identificar empresas/concorrentes com atuação similar ou oferta de produto compatível a solução oferecida. Em entrevista com parceiros, todos afirmaram que para fabricação de seus produtos é utilizado como matéria-prima sais de fertilizantes ou reagentes analíticos. Os entrevistados afirmaram que desconhecem empresas que utilizam soluções de nutrientes como matéria-prima para fabricação de fertilizantes. Neste caso por falta de informações de mercado com os contatos realizados, o produto Aqua apresenta um custo de produção de R\$4,05 L<sup>-1</sup> e precificação inicialmente em R\$16,21, uma margem de 75%.

Este valor tem como referência os produtos de mercado (modelo B2C) com valores variando de R\$30,00 – R\$100,00 L<sup>-1</sup>. O valor foi definido por meio da comparação com os teores nutricionais dos produtos.

#### **3.5.2.5 Projeção de vendas**

Busca-se realizar as primeiras vendas dos produtos a partir do segundo semestre do ano em que iniciar as atividades da planta piloto, após seus devidos ajustes. Este período coincide com a adubação das lavouras de milho e café. Nas lavouras de café pode estender geralmente dos meses de novembro a fevereiro na região de Viçosa.

É provável que o produto da linha Aqua seja comercializado pouco antes, pois matéria-prima para produção de fertilizantes foliares, necessitando de processamento antes do período de alta demanda.

#### **3.5.2.6 Produção**

Os dados apresentados na tabela 13 foram obtidos a partir das seguintes informações de produção anual e suas respectivas porcentagens de crescimento: Nela também é apresentado o EBITDA que é uma medida financeira que representa o lucro antes de juros, impostos, depreciação e amortização. Ele é frequentemente utilizado como um indicador do desempenho operacional de uma empresa, pois exclui os efeitos de itens não recorrentes e não relacionados às operações principais. Essa medida é importante para investidores e analistas, pois permite uma comparação mais consistente do desempenho de diferentes empresas. No entanto, é importante lembrar que o EBITDA não leva em consideração os custos de capital, como juros e impostos, e, portanto, não é uma medida completa do desempenho financeiro de uma empresa (Damodaran, 2002).

- Ano 1 produção inicial de **82 t/mês** de Organo e **10.000** litros/mês de solução N, P, S , com taxa de crescimento de **0%**.
- Ano 2, produção inicial de **107,53 ton/mês** de Organo e **12.000** litros/mês de solução N, P, S , com taxa de crescimento de **1,67% por mês (20% a.a)**.
- Ano 3, produção inicial de **129,03 teladas/mês** de organocelan e **13.600** litros/mês de solução N, P, S , com taxa de crescimento de **4,17% por mês (50% a.a)**.

**Tabela 13.** Fluxo de caixa para o Ano 1, Ano 2 e Ano 3 da planta piloto

Itens	Ano 1	Ano 2	Ano 3
<b>(+) Faturamento Bruto</b>	<b>R\$ 4.359.264,31</b>	<b>R\$ 5.738.302,36</b>	<b>R\$ 8.262.270,33</b>
<b>(-) Impostos sobre Receita</b>	<b>-R\$ 621.195,16</b>	<b>-R\$ 817.708,09</b>	<b>-R\$ 956.803,34</b>
ISS	-R\$ 217.963,22	-R\$ 286.915,12	-R\$ 413.113,52
PIS/COFINS	-R\$ 403.231,95	-R\$ 530.792,97	-R\$ 543.689,83
<b>(=) Faturamento Líquido</b>	<b>R\$ 3.738.069,14</b>	<b>R\$ 4.920.594,27</b>	<b>R\$ 7.305.466,99</b>
<b>(-) OPEX</b>	<b>-R\$ 3.660.187,64</b>	<b>-R\$ 4.105.534,27</b>	<b>-R\$ 5.682.875,29</b>
<b>(-) Custos ligados a solução</b>	<b>-R\$ 2.565.504,43</b>	<b>-R\$ 2.856.651,05</b>	<b>-R\$ 4.035.592,08</b>
<b>(-) Pessoal</b>	<b>-R\$ 528.000,00</b>	<b>-R\$ 672.000,00</b>	<b>-R\$ 1.070.400,00</b>
Fundadores	-R\$ 144.000,00	-R\$ 192.000,00	-R\$ 288.000,00
Administrativos	-R\$ 144.000,00	-R\$ 216.000,00	-R\$ 360.000,00
Operacionais	-R\$ 144.000,00	-R\$ 158.400,00	-R\$ 264.000,00
Comerciais	-R\$ 96.000,00	-R\$ 105.600,00	-R\$ 158.400,00
<b>(-) Despesas Gerais</b>	<b>-R\$ 566.683,22</b>	<b>-R\$ 576.883,22</b>	<b>-R\$ 576.883,22</b>
<b>(=) EBITDA</b>	<b>R\$ 77.881,50</b>	<b>R\$ 815.060,00</b>	<b>R\$ 1.622.591,69</b>
<b>(-) Impostos sobre Lucro</b>	<b>-R\$ 18.691,56</b>	<b>-R\$ 195.614,40</b>	<b>-R\$ 454.833,46</b>
IRPJ/CSLL	-R\$ 18.691,56	-R\$ 195.614,40	-R\$ 454.833,46
<b>(=) Lucro Líquido</b>	<b>R\$ 59.189,94</b>	<b>R\$ 619.445,60</b>	<b>R\$ 1.167.758,24</b>
<b>(-) CAPEX</b>	<b>-R\$ 694.600,00</b>	<b>-R\$ 375.000,00</b>	<b>-R\$ 355.000,00</b>
Infraestrutura básica	-R\$ 130.000,00	R\$	R\$
Infraestrutura técnica	-R\$ 564.600,00	-R\$ 375.000,00	-R\$ 355.000,00
<b>(=) Fluxo de Caixa Livre</b>	<b>-R\$ 635.410,06</b>	<b>R\$ 244.445,60</b>	<b>R\$ 812.758,24</b>
<b>(=) Fluxo de Caixa Acumulado</b>	<b>-R\$ 635.410,06</b>	<b>R\$ 244.445,60</b>	<b>R\$ 812.758,24</b>

### 3.5.3 Avaliação dos Indicadores de Viabilidade Econômica e financeira do Projeto

#### 3.5.3.1 Análise swot

A análise SWOT revelou que a empresa possui vários pontos fortes, incluindo diferenciais significativos em relação à concorrência, uso de matéria-prima vegetal (cama de aviário), obtenção de amônia a partir de proceso biológico, capacidade de customização de produtos. No entanto, existem também algumas fragilidades, como a competição com alternativas de adubação orgânica, a dependência de insumos controlados pelo governo, desafios logísticos (frete), flutuações nos preços das matérias-primas e a necessidade de manter o processo em segredo industrial. Essas informações são cruciais para o desenvolvimento de estratégias que maximizem os pontos fortes e mitiguem as vulnerabilidades identificadas.

#### 3.5.3.2 Análise dos Concorrentes

Após uma avaliação meticulosa das empresas concorrentes, foram identificadas cinco empresas líderes em seus respectivos segmentos de mercado, cada uma com uma gama diversificada de produtos e serviços. Essas empresas foram selecionadas com base em critérios estratégicos, incluindo a qualidade de seus produtos, sua presença no mercado, a satisfação do cliente e a inovação contínua. As empresas identificadas são:

##### 1. Empresa A:

**Produto 1** - Fertilizante Mineral Misto foliar (N 10,5%, Mg 3%, S 9,88%, B 3%, Cu 0,25%, Mn 3%, Zn 8%, Mo 0,2%, K<sub>2</sub>O 3%);

**Produto 2** - Fertilizante Mineral Misto foliar (N 3% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 17% ).

**Pontos relevantes:** Empresa vende fertilizantes foliares específicos para cada cultura e não possui produto organomineral.

##### 2. Empresa B:

**Produto 1** - Fertilizante Mineral Misto foliar (N 1% , Mg 1%, S 6%, Zn 10%); **Produto 2**

- Fertilizante Mineral Misto foliar (N 1%, S 6%, B 0.3 % , Cu 0.1 % , Mn 10 % , Mo 0,05 % e Zn 1% );

**Produto 3** – Fertilizante organico com alto teor de carbono (N 3%, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 1%, K<sub>2</sub>O 1% , COT 16%).

**Pontos relevantes:** Empresa vende fertilizantes foliares específicos para cada cultura, produto orgânico é vendido em suspensão, juntamente com N, P e K.

##### 3. Empresa C:

**Produto 1** - Fertilizante Mineral Misto Foliar (10% N, 5% Zn, 2.3% S, 1% B, 0.05 %Mo);

**Produto 2** - Fertilizante organomineral foliar (K<sub>2</sub>O 5.3 %, COT 5.9%)

**Pontos relevantes:** Preço: R\$25,00 / L ( Produto 1 - Café) ; R\$73,00 / L ( Produto 2 - Café)

#### **4. Empresa D:**

**Produto 1** - Fertilizante Mineral Misto Foliar (10% K<sub>2</sub>O, 12% S, 1.5% B , 1.5% Cu, 14% Mn e 4.5% Zn);

**Produto 2** - Fertilizante Mineral Misto Foliar (10% N, 8% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 6% K<sub>2</sub>O, 0.3% B, 6% COT, 0.3 % Cu, 1% Mn, 0.1 % Mo e 1% Zn.)

**Pontos relevantes:** A empresa também fornece sais solúveis como óxidos e sulfatos.

#### **5. Empresa E:**

**Produto 1** - Fertilizante Mineral Misto Foliar ( 6Ca, 1Mg, 1S);

**Produto 2** - Fertilizante Mineral Misto Foliar ( 19%N, 4% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 19% K<sub>2</sub>O, 1%Mg, 1%S, 0.1%B, 0.1% Zn).

**Pontos relevantes:**A empresa é a maior produtora de amônia do mundo, produz também HNO<sub>3</sub>.

As empresas supracitadas representam uma amostra significativa do mercado e são essenciais para a compreensão do cenário competitivo na área de fertilizantes. A análise dessas empresas permite uma compreensão mais profunda das tendências do mercado, das estratégias de negócios e das oportunidades de crescimento para a empresa em estudo.

### **3.5.3.3 Análise de mercado (Linha Organo – B2C)**

A análise com potenciais clientes da linha Organo, realizada em parceria com a EMATER-MG, mostrou resultados promissores. Durante visitas, conversas e aplicação de questionários, foram entrevistados 6 produtores de café da região de Araponga-MG, sendo 2 deles focados na produtividade tradicional e 4 na qualidade do fruto. Além disso, 11 produtores da região de Cajuri e Viçosa – MG, com cultivo de milho, feijão, café e horticultura, também foram entrevistados.

Os produtores de café demonstraram interesse em utilizar os produtos da Linha organomineral. A maioria utiliza fertilizantes inorgânicos NPK e orgânicos produzidos na própria fazenda, como casca de café e esterco bovino. Eles conhecem fertilizantes organominerais e os utilizam de acordo com a recomendação técnica, adquirindo-os no comércio local.

Os produtores de culturas variadas, com áreas menores de plantação, também mostraram interesse em utilizar os produtos da Linha organomineral. A maioria utiliza fertilizantes inorgânicos NPK, e alguns utilizam cama de frango e esterco bovino como fertilizantes orgânicos. A maioria não conhecia fertilizantes organominerais, mas se mostrou aberta a testar os produtos.

Esses resultados indicam uma receptividade positiva dos produtores em relação à Linha organomineral, e a disposição para testar os produtos é um indicativo promissor para futuras parcerias.

#### **3.5.3.4 Análise de mercado (Linha Aqua – B2B)**

A análise dos resultados obtidos nas entrevistas com os potenciais clientes da linha Aqua revelou um interesse significativo no uso de soluções e sais produzidos a partir de "amônia verde" obtida pelo processo tecnológico. As empresas de fertilizantes, que atendem tanto o mercado de macro e micronutrientes quanto o de fertilizantes especiais, mostraram interesse em testar esses produtos. Embora algumas empresas indiquem que preferem fazer a formulação de seus próprios produtos, todas demonstraram disposição para parcerias que permitam testar as soluções e sais produzidos pela fábrica. Isso sugere um potencial de mercado para a linha Aqua, especialmente se a qualidade, eficácia e benefícios ambientais da "amônia verde" forem claramente demonstrados e comprovados.

Esses resultados destacam a importância de continuar o desenvolvimento e aprimoramento dos produtos da linha Aqua, bem como a necessidade de uma estratégia de marketing eficaz para destacar seus benefícios e diferenciais. Além disso, a disposição das empresas em fazer parcerias para testar os produtos sugere que uma abordagem colaborativa pode ser uma estratégia eficaz para ganhar a confiança e a adoção desses potenciais clientes.

#### **3.5.3.5 Análise de fornecedores/parceiros**

A análise sobre a matéria-prima utilizada pela fábrica para a obtenção da amônia revelou um potencial significativo de aproximadamente 4,0 mil toneladas de cama de frango produzidas na região de Viçosa, considerando o ciclo de 45 dias de produção. A região abrange diversas cidades, incluindo Cajuri, Pedra do Anta, Paula Cândido, Porto Firme, Teixeira e Viçosa, com uma produção média de 1,7 milhões de aves (PIF-PAF). Para garantir um suprimento contínuo de cama de frango, está previsto um acordo de parceria com os produtores locais, garantindo a disponibilidade do material conforme a demanda da planta. Além disso, as matérias-primas utilizadas nos processos de amonificação, como o sulfúrico e o fosfórico, serão adquiridas de

empresas que garantem a entrega em um prazo de 15 a 20 dias, desde que a solicitação seja feita com um prazo mínimo de 15 dias. Essas medidas estratégicas contribuirão para a eficiência e a sustentabilidade da operação da fábrica, garantindo um suprimento estável e pontual das matérias-primas essenciais para o processo de produção.

### **3.5.3.6 Análise dos indicadores econômicos**

O estudo de viabilidade econômica faz uso de cinco métodos para assegurar seu resultado: cálculo do VPL (Valor Presente Líquido do projeto), o índice considera que o dinheiro no futuro vale menos do que o atual, desta forma, ele garante a segurança do investimento, apontando a viabilidade do projeto; cálculo da TIR (Taxa interna de retorno), este cálculo expressa de forma relativa o percentual que o projeto pode render para o investidor; TMA (Taxa mínima de atratividade), este índice utiliza como base a taxa básica de juros da SELIC, sendo expressa em porcentagem, neste caso se a TMA for maior que a SELIC presume-se que vale a pena investir na proposta, com vistas ao financeiro. Considera-se o cálculo do TRC (Tempo retorno capital), este índice mostra o tempo necessário para o investidor recuperação do investimento. O payback simples expressa a viabilidade do projeto em anos. Ou seja, quanto tempo se leva para recuperar o investimento, dado o fluxo de caixa esperado. O RBC% é um método de análise financeira que avalia o retorno sobre o capital investido, considerando a rentabilidade média anual do projeto. Esses métodos são essenciais para avaliar a viabilidade econômica de projetos e investimentos, fornecendo informações cruciais para a tomada de decisão.

- A taxa mínima de atratividade (TMA) utilizada para cálculo do VPL e TIR, foi de 12,00%, que corresponde à taxa básica de juros, Selic, em 23/04/2022, 11,75% (BCB, 2021).
- A TIR deve ser comparada à TMA, quando  $TIR > TMA$ , significa viabilidade do projeto. Também a TIR é a taxa de juros que torna o VPL do fluxo de caixa igual a zero.
- O VPL positivo deve ser interpretado como o potencial de geração de riqueza da planta piloto, recomendando sua aceitação. O VPL positivo indica que o projeto é capaz de recuperar o capital investido, remunerando esse capital à taxa mínima exigida, e ainda gerando um excedente, que é expresso pelo VPL.
- O (RBC%) indica a viabilidade do investimento, onde, para cada R\$1,00 investido, retorna R\$1,11 (11%) .

**Tabela 14.** Resultados dos indicadores de viabilidade.

TMA - Taxa Mínima de Atratividade	<b>12%</b>
TIR - Taxa Interna de Retorno	<b>34%</b>
VPL - Valor Presente Líquido (ganho real do investimento)	<b>R\$206.045,39</b>
TRC (Descontado – 11,75) - anos	<b>Ano 1, Mês 11</b>
RBC(11,75%)	<b>R\$1,11</b>

A partir destes resultados, ao investir R\$ 694.600,00 (CAPEX) na planta piloto de recuperação de amônia, o investidor pode conseguir um retorno de R\$ 206.045,39 em um período de aproximadamente 1 ano e 11 meses.

### 3.6 CONCLUSÃO

O estudo de viabilidade técnica e econômica demonstrou o potencial de produção de fertilizantes organominerais na região de Viçosa-Minas Gerais, com aplicação do processo de recuperação de amônia desenvolvido. Vale ressaltar que a implantação de uma planta para produção de organominerais pode oferecer um produto fabricado na região com menor custo de venda, pois o fertilizante seria produzido em escala regional e com abastecimento de produtores avícolas da região.

Os indicadores de fluxo de caixa foram TMA (Taxa mínima de atratividade) de 12% indicou a viabilidade de investimento na planta de produção como positiva, sendo esta maior que a taxa SELIC avaliada durante o estudo (2022). Com um TIR (Taxa interna de retorno) de 34% e VPL (Valor presente líquido) de R\$206.045,39 que indicam o potencial ganho de investimento na fábrica e retorno de investimento TRC (Broken even/PayBack) de 1 ano e 11 mês. A Razão Benefício Custo Descontado (RBC%), obteve um resultado de 11%, onde a cada R\$1,00 investido é esperado retorno de R\$1,11.

Os resultados obtidos para a implantação da planta encapsulam, de forma abrangente, a previsão mais aproximada da viabilidade econômica e financeira da produção de fertilizantes organominerais na localidade de Viçosa, Minas Gerais. Todavia, dado o caráter prolongado do investimento e a consideração de um contexto regional específico, como o município em questão, é importante ressaltar que os valores das variáveis empregadas nos cálculos podem sofrer flutuações ao longo do horizonte de investimento, podendo diferir dos valores inicialmente contemplados no projeto.

#### 4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABISOLO. Anuário Brasileiro de Tecnologia em Nutrição Vegetal. 2020.

Akdeniz, N., & Janni, K. A. (2012). Full-scale biofilter reduction efficiencies assessed using portable 24-hour sampling units. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 62, 170–182. <https://doi.org/10.1080/10473289.2011.639479>

Asada, T., Ishihara, S., Yamane, T., Toba, A., Yamada, A., & Oikawa, K. (2002). *Science of Bamboo Charcoal: Study on Carbonizing Temperature of Bamboo Charcoal and Removal Capability of Harmful Gases*.

Adami, A. "LES 0667–Gestão de Risco no Agronegócio." Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (2020).

Bichara, J. P. (1994). *Fertilizantes e adubação*. São Paulo: Editora Agronômica Ceres.

Bruni, A. L., et al. "Análise do risco na avaliação de projetos de investimento: uma aplicação do método de Monte Carlo." *Caderno de pesquisas em Administração* (1998)

Brasil. Secretaria de Assuntos Estratégicos. (2021). *Plano Nacional de Fertilizantes 2050: Uma Estratégia para os Fertilizantes no Brasil* (p. 195).

BRANSON, Richard. *The Importance of Cash Flow*. Virgin, London, 2015. 224 p.

Brigham, E. F.; Ehrhardt, M. C. *Financial Management: Theory and Practice*. Cengage Learning, 2013.

Damodaran, A. (2002). *Investment Valuation: Tools and Techniques for Determining the Value of Any Asset*. Wiley.

Chagas, A. P. (2007). A síntese da amônia: alguns aspectos históricos. *Química Nova*, 30, 240–247. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422007000100039>

Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). *Safra Brasileira de Café; 2022* [citado em 9 de dezembro de 2022]. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/café>.

CHANG, H. *Marketing Estratégico: Da Teoria à Prática*. São Paulo: Pearson, 2019.

DRUCKER, Peter Ferdinand. *O Gerente Eficaz*. 5. ed. São Paulo: Editora Sextante, 2016. 304 p.

Garcia, G., Cardoso, A. A., & Dos Santos, O. A. M. (2013). Da escassez ao estresse do planeta: um século de mudanças no ciclo do nitrogênio. *Química Nova*, 36, 1468–1476. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422013000900032>

GUO, Y. *Gestão de Equipes Multifuncionais: Teoria e Prática*. São Paulo: Atlas, 2016.

Hadlocon, L. J. S., Manuzon, R. B., & Zhao, L. (2015). Development and evaluation of a full-scale spray scrubber for ammonia recovery and production of nitrogen fertilizer at poultry

facilities. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 36, 405–416. <https://doi.org/10.1080/09593330.2014.950346>

INCO - VPL: o que é, vantagens e desvantagens e como calcular o Valor Presente Líquido? 2022. Disponível em: <<https://blog.inco.vc/mercado-financeiro/vpl/>>.

Kafle, G. K., Chen, L., Neibling, H., & Brian He, B. (2014). Field evaluation of wood bark-based down-flow biofilters for mitigation of odor, ammonia, and hydrogen sulfide emissions from confined swine nursery barns. *Journal of Environmental Management*, 147, 164–174. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.09.004>

Chen, L., & Hoff, S. J. (2009). Mitigating Odors from Agricultural Facilities: A Review of Literature Concerning Biofilters. *Applied Engineering in Agriculture*, 25, 751–766. <https://doi.org/10.13031/2013.28854>

LEE, C. *Economia Circular: Princípios e Práticas para Sustentabilidade e Inovação*. Porto Alegre: Bookman, 2020.

LEE, C. *Sustainable Operations and Supply Chain Management*. Wiley, 2021.

LIU, Z. *Agricultural Economics and Management*. Springer Nature, 2015.

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). MAPA Indicadores; 2022 [citado em 9 de dezembro de 2022]. Disponível em: <https://indicadores.agricultura.gov.br/fertilizantes/index.htm>.

Oviedo-Rondón, E. O. (2008). Tecnologias para mitigar o impacto ambiental da produção de frangos de corte. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 37, 239–252. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982008001300028>

Paiva, D. M. de, Guimarães, G. G. F., Teixeira, B. C., & Cantarutti, R. B. (2019). Value of Functionalized Charcoal for Increasing the Efficiency of Urea N Uptake: Insights into the Functionalization Process and the Physicochemical Characteristics of Charcoal. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 43. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcS20180200>

Park, S. J., & Jin, S. Y. (2005). Effect of ozone treatment on ammonia removal of activated carbons. *Journal of Colloid and Interface Science*, 286, 417–419. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2005.01.043>

Manuzon, R. B., Zhao, L. Y., Keener, H. M., & Darr, M. J. (2007). A Prototype Acid Spray Scrubber for Absorbing Ammonia Emissions from Exhaust Fans of Animal Buildings. *Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers)*, 50, 1395–1407. <https://doi.org/10.13031/2013.23628>

NOGUEIRA, C. A. B. *Análise de Investimentos - Ferramentas e Técnicas*. São Paulo: Atlas, 2011.

NORONHA, A. B. *Engenharia Econômica*. São Paulo: Pioneira, 1987.

NOGUEIRA, G. Gestão de Resíduos na Indústria: Práticas Sustentáveis e Tecnologias de Tratamento. São Paulo: Érica, 2017.

ROZENFELD, H. et al. Gestão de Desenvolvimento de Produtos - Uma Referência para a Melhoria do Processo. São Paulo: Saraiva, 2015.

Samanez, C. P. "Matemática Financeira". 5a edição. Pearson Prentice Hall (2010).

Santos, J. S. (2020). Simulação do Processo Phosam para Recuperação de Amônia: Avaliação Energética e Econômica. - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

Sheridan, B., Curran, T., Dodd, V., & Colligan, J. (2002). Biofiltration of Odour and Ammonia from a Pig Unit: a pilot-scale Study. *Biosystems Engineering*, 82, 441–453. <https://doi.org/10.1006/bioe.2002.0083>

Showqi, I., Lone, A., Ashraf, M., Mehmood, M. A., & Rashid, A. (2016). Biofilters in Mitigation of Odour Pollution - A Review. *Nature Environment and Pollution Technology: An International Quarterly Scientific Journal*, 15, 1177–1185.

SOUZA, P. Estratégias Competitivas: Teorias e Práticas. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.

Taghizadeh-Toosi, A., Clough, T. J., Sherlock, R. R., & Condrón, L. M. (2012). Biochar adsorbed ammonia is bioavailable. *Plant and Soil*, 350, 57–69. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0870-3>

Ullman, J. L., Mukhtar, S., Lacey, R. E., & Carey, J. B. (2004). A review of literature concerning odors, ammonia, and dust from broiler production facilities: 4. Remedial management practices. *Journal of Applied Poultry Research*, 13, 521–531. <https://doi.org/10.1093/japr/13.3.521>

Valdés, H., Sánchez-Polo, M., Rivera-Utrilla, J., & Zaror, C. A. (2002). Effect of ozone treatment on surface properties of activated carbon. *Langmuir*, 18, 2111–2116. <https://doi.org/10.1021/la010920a>

WANG, Y. Sustainable Logistics and Supply Chain Management: *Principles and Practices for Sustainable Operations and Management*. Springer Nature, 2018.

Wang, L., Oviedo-Rondón, E. O., Small, J., Liu, Z., Sheldon, B. W., Havenstein, G. B., & Williams, C. M. (2010). Farm-scale evaluation of ozonation for mitigating ammonia concentrations in broiler houses. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 60, 789–796. <https://doi.org/10.3155/1047-3289.60.7.789>

Wood, D. J., & Van Heyst, B. J. (2016). A review of ammonia and particulate matter control strategies for poultry housing. *Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers)*, 59, 329–344. <https://doi.org/10.13031/trans.59.10836>

Woiler, S., et al. "Projetos: planejamento, elaboração e análise. São Paulo: Atlas (1983).

ZHANG, L. Supply Chain Management in Agriculture. CRC Press, 2011.

## 5 ANEXOS

### 5.1 ANEXO 1 – QUESTIONÁRIO PRODUTORES (B2C)

#### Pesquisa de mercado – produtor

A empresa propõe produzir um adubo organomineral baseado em tecnologia desenvolvida com pesquisa dos Departamento de Solos e Química – Engenharia química da UFV. Além de utilizar matéria prima orgânica regional e ser produzido por um processo limpo, com reduzida emissão amônia, ele pode ser formulado de acordo com as necessidades específicas do agricultor.

1. Das culturas abaixo quais o você. cultiva?  
( ) café, ( ) café especial, ( ) milho, ( ) feijão
2. Qual é a área cultivada ?
3. Qual o tipo de adubo você utiliza na sua lavoura?
4. Qual o adubo orgânico você utiliza? (Se na 3ª indicar que usa orgânico)
5. Você conhece adubo organomineral ? ( se na 3ª não indicar organomineral)
6. Qual organomineral você utiliza?
7. Qual é formulação do organomineral?
8. Qual é a dose você aplica do organomineral?
9. Qual é o fornecedor do organomineral?
10. Qual é o preço que você pagou na última compra pelo organomineral?

## 5.2 ANEXO 2 – QUESTIONÁRIO INDÚSTRIAS (B2B)

### Pesquisa de mercado – Indústria

A empresa desenvolvida a partir de pesquisa realizada no Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa. A tecnologia da empresa utiliza resíduos agroindustriais como fonte de “amônia verde” com o propósito de produzir matérias-primas para a indústria de nutrição de plantas.

1. O portfólio de fertilizantes fluidos de sua empresa atende:

- ( ) Nutrição de macronutrientes  
 ( ) Nutrição de micronutrientes  
 ( ) Nutrição de macro e micronutrientes  
 ( ) Nutrição especial  
 ( ) Outros: \_\_\_\_\_

2. A sua empresa utilizaria como matéria-prima alguma(s) das soluções abaixo produzidas a partir de “amônia verde”?

- ( ) 5,6%N, 10,6%P 0,0%S  
 ( ) 9,7%N, 11,8%P 0,0%S  
 ( ) 11,4%N, 0,0%P 12,0%S  
 ( ) 9,0%N, 5,0%P 6,0%S  
 ( ) Não

3. A sua empresa utilizaria como matéria-prima algum(ns) dos sais abaixo produzidos a partir de “amônia verde”?

- ( ) 12,3%N, 23,1%P 0,0%S  
 ( ) 18,5%N, 22,45%P 0,0%S  
 ( ) 21,6%N, 00,00%P 23,0%S  
 ( ) 18,7%N, 10,56%P 12,1%S  
 ( ) Não

4. Seria de interesse que estas matérias-primas fossem fornecidas com teores de N, P e S customizados de acordo com a demanda de sua empresa? ( ) Sim ( ) Não

5. A empresa teria interesse em firmar uma parceria com para testar estas matérias-primas na formulação dos seus fertilizantes fluídos? ( ) Sim ( ) Não