

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA

ALICE AKEMI TAGIMA

CARACTERIZAÇÃO DO DIGESTATO DA USINA DE BIOENERGIA DO
IEE USP PARA APLICAÇÃO COMO BIOFERTILIZANTE

SÃO PAULO

2023

ALICE AKEMI TAGIMA

CARACTERIZAÇÃO DO DIGESTATO DA USINA DE BIOENERGIA DO IEE USP
PARA APLICAÇÃO COMO BIOFERTILIZANTE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. Ildo Luís Sauer

Versão Corrigida

SÃO PAULO

2023

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

FICHA CATALOGRÁFICA

Tagima, Alice Akemi.

Caracterização do digestato da usina de produção de bioenergia do IEE USP para aplicação como biofertilizante. / Alice Akemi Tagima; orientador: Ildo Luis Sauer. – São Paulo, 2023.

66 f.: il; 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Energia – Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo.

1. Biogás. 2. Digestão anaeróbia. 3. Bioenergia. 4. Fertilizantes biológicos. 5. Efluentes. I. Título.

Elaborado por Maria Penha da Silva Oliveira CRB-8/6961

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Ildo Luis Sauer por ter me orientado, por ter acreditado no meu trabalho, por me apoiar em diversas situações. Serei eternamente grata a tudo que o senhor fez para mim até pelos puxões de orelhas.

Ao IEE pelo bom acolhimento e estrutura dada.

Ao prof. Roberto Zilles, Diretor do IEE durante o meu Mestrado, por ter me dado credibilidade em uma fase difícil.

À equipe CPLEN: Samantha Christine Santos, Júlia Carolina Bevervanso Borba Ferrarese, Priscila Rosseto Camilloti, Camila Agner D'Aquino, Bruno Alves Pereira, Paulo Roberto Aparecido Americo da Silva, Alexandre Alves Mendonça, Alcantaro Lemes Rodrigues por terem me auxiliado seja no laboratório como na parte teórica e escrita.

Ao Nilton Bispo Amado, Michael Abas, Erick Del Bianco Pelegia, Welson Bassi, Julieta Puerto Rico que de alguma forma me ajudaram com troca de conhecimentos.

Ao apoio financeiro do Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis –PRH-ANP, suportado com recursos provenientes do investimento de empresas petrolíferas na Cláusula de P, D&I da Resolução ANP nº 50/2015 (PRH 33.1 - Referente ao EDITAL Nº1/2018/PRH-ANP; Convênio FINEP/FUSP/USP Ref. 0443/19).

Ao meu noivo, Bira, que esteve junto comigo nesse processo e sempre me acolheu com belas palavras para tentar tranquilizar a tensão. Sem seu cuidado nada disso seria possível. Também serei eternamente grata a você.

À minha sogra, Eulália Moreno Chaves, que sempre me apoiou e esteve presente quando eu mais precisava e me aconselhou.

Ao meu enteado, Vinicius, que sempre conseguiu alegrar meus dias com suas brincadeiras, tornando tudo mais calmo.

Ao meu pai, Dario, e minha mãe, Sonia, que também me apoiaram durante essa etapa da minha vida e me acreditaram no meu trabalho.

Aos meus amigos, que estiveram dentro e fora da pós-graduação, pelas trocas e conselhos. Vocês foram ótimos companheiros.

RESUMO

TAGIMA, A. A. **Caracterização do Digestato da Usina de Bioenergia do IEE USP para aplicação como Biofertilizante**. 2023. 66 f. Dissertação (Mestrado em Energia –Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo,2023.

Uma alternativa para a valorização dos resíduos orgânicos é a produção de biogás e do digestato (fertilizante), produtos do processo de biodigestão anaeróbia dos resíduos orgânicos. O digestato, pelo seu teor de nutrientes, tem um potencial de biofertilizante. No Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo, está em operação a Usina de Bioenergia e Biofertilizantes com Resíduos Orgânicos. A Usina processou 460 toneladas de resíduos e produziu 850 m³ de digestato, o que gerou 65 MWh de energia elétrica, até julho de 2023. Este trabalho focou na caracterização do digestato, avaliando seu potencial uso como biofertilizante. Para isso foram analisadas 5 amostras do digestato, examinando as concentrações de macro e micronutrientes e verificando a presença de patógenos dentro dos 500 dias de operação da Usina. Além disso, em uma das amostras, o digestato foi submetido a dois processos de separação: decantação e centrifugação, podendo avaliar seu balanço de massa. Os resultados obtidos são, coerentes com os da literatura e indicam o uso potencial do digestato como fertilizante, em razão do teor de macronutrientes (NPK), micronutrientes e pela ausência de contaminantes patógenos e metais pesados. Um dos elementos que esteve em alta concentração foi o sódio, porém, em uma análise feita posteriormente, foi visto que está dentro do limite estabelecido pela CETESB. O uso do digestato demonstra o benefício econômico e ambiental do aproveitamento de resíduos orgânicos, resultando em um efetivo pacote tecnológico.

Palavras Chaves: Biogás, Digestão anaeróbia, Bioenergia, Biofertilizantes, Efluentes

ABSTRACT

TAGIMA, A. A. **Characterization of Digestate from the IEE USP Bioenergy Production Plant for application as a Biofertilizer**. 2023. 66 f. Dissertação (Mestrado em Energia –Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023

One alternative for the recovery of organic waste is the production of biogas and digestate (fertilizer), products of the anaerobic bio-digestion process of organic waste. Digestate has biofertilizer potential due to its nutrient content. At the Energy and Environment Institute of the University of São Paulo, the Bioenergy and Biofertilizer Production Plant with Organic Waste is in operation. The plant has processed 460 tons of waste and produced 850 m³ of digestate, generating 65 MWh of electricity by July 2023. This work focused on the characterization of the digestate to assess its potential use as a biofertilizer. To this end, 5 samples of digestate were analyzed to determine the concentrations of macro- and micronutrients and to check for the presence of pathogens within the 500 days of the plant's operation. In addition, in one of the samples, the digestate was subjected to two separation processes: decantation and centrifugation, in order to evaluate its mass balance. The results obtained are in agreement with those reported in the literature and indicate the potential use of digestate as a fertilizer, due to the content of macronutrients (NPK), micronutrients and the absence of pathogenic contaminants and heavy metals. One of the elements that was present in high concentration was sodium, but a subsequent analysis showed that it was within the limit set by the CETESB. The use of digestate demonstrates the economic and environmental benefits of using organic waste.

Keywords: Biogas, Anaerobic digestion, Bioenergy, Biofertilizer, Effluents

LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

C.E. – Condutividade Elétrica

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CSTR – *Continuous Stirred-Tank Reactor*

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Embrapa Suínos e Aves

ETE – Estaco de tratamento de esgoto

FL – Fase líquida

FS – Fase sólida

IN – Instruo Normativa

IEE – Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

MMA – Ministério do Meio Ambiente

SF – Sólidos Fixos

ST – Sólidos Totais

SV – Sólidos Voláteis

TDH – Tempo de Detenco Hidráulica

USP – Universidade de São Paulo

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – 3 biorreatores da Usina de Bioenergia e Biofertilizante com Resíduos Orgânicos do IEE.----- | 14 |
| Figura 2 - Processos da Usina de Bioenergia e Biofertilizantes com Resíduos Orgânicos. --- | 15 |
| Figura 3 – Relação de uso de fertilizantes com produção de grãos e área destinada para plantação entre os anos de 1992 e 2010. ----- | 17 |
| Figura 4– Representação gráfica da produção e demanda mundial de fertilizantes do ano de 2018.----- | 18 |
| Figura 5- Representação gráfica de consumo de fertilizantes importados no Brasil.----- | 18 |
| Figura 6 - Cadeia de produção de fertilizantes.----- | 21 |
| Figura 7 - Representação do Plano Estratégico do PNF. ----- | 28 |
| Figura 8 - Distribuição dos principais constituintes do digestato após a separação das frações. ----- | 38 |
| Figura 9 - Pontos de coleta no Tanque 2 do Biorreator da Usina Experimental de Biogás. --- | 43 |
| Figura 10 - Separação das fases do digestato por decantação após 48 horas em uma proveta de 1000 mL..----- | 43 |
| Figura 11- Separação das fases do digestato por centrifugação. ----- | 44 |
| Figura 12- Representação gráfica dos valores de NPK do digestato (período de julho de 2021 até agosto de 2022). ----- | 49 |
| Figura 13– Balanço de massa do digestato no processo de separação na decantação. ----- | 52 |
| Figura 14- Balanço de massa do digestato no processo de separação por centrifugação. ----- | 52 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Classificação de fertilizantes comerciais..... | 20 |
| Tabela 2 - Funções do NPK e suas formas de absorção..... | 22 |
| Tabela 3 - Legislação pertinente ao uso de biofertilizantes..... | 23 |
| Tabela 4 - Valores limites instruídos na IN 27 de 2006. | 25 |
| Tabela 5 - Concentração máxima de patógenos permitida pela Resolução 375 do CONAMA. | 26 |
| Tabela 6 - Limites dos valores de RAS de acordo com a Condutividade Elétrica..... | 26 |
| Tabela 7– Características do digestato de resíduos alimentares sem tratamento. | 30 |
| Tabela 8 - Trabalhos que utilizaram o digestato como biofertilizante. | 35 |
| Tabela 9 - Concentrações de Nitrogênio e Fósforo do digestato de dejetos bovinos pós-tratado. | 40 |
| Tabela 10 - Períodos das coletas de amostra de digestato..... | 42 |
| Tabela 11 - Análises físico-químicas feitas nas amostras líquida e sólida e as metodologias correspondentes. | 45 |
| Tabela 12 - Resultados das 5 análises físico-químicas do digestato bruto..... | 47 |
| Tabela 13 - Comparação da média dos resultados do digestato com os valores encontrados em literatura..... | 50 |
| Tabela 14 - Concentrações de nutrientes no digestato bruto e nas porções separadas por decantação e centrifugação..... | 51 |
| Tabela 15 - Resultados da análise dos metais pesados das 5 amostras de digestato bruto..... | 53 |
| Tabela 16 - Resultado da análise biológica feita no digestato em junho/22..... | 54 |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 11 |
| 2. OBJETIVOS..... | 12 |
| Objetivos específicos | 12 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 13 |
| 3.1. Descrição do processo da Usina de Bioenergia e Biofertilizantes com resíduos orgânicos..... | 13 |
| 3.2. Uso de fertilizantes | 16 |
| 3.2.1 Tipos de fertilizantes | 19 |
| 3.2.2. Biofertilizantes | 22 |
| 3.3. Legislação Brasileira e Normativas | 23 |
| 3.4. Regulação para uso de digestato e incentivos..... | 27 |
| 3.5. Caracterização de digestato do processamento de resíduos alimentares | 29 |
| 3.6. Uso do digestato como fertilizantes | 32 |
| 4. MATERIAIS E MÉTODOS | 42 |
| 4.1 Coleta e preparação das amostras | 42 |
| 4.2. Balanço de massa..... | 43 |
| 4.2 Ensaio e análises e suas metodologias | 45 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES | 47 |
| 5.1 Balanço de massa..... | 50 |
| 5.2 Metais pesados | 52 |
| 5.3 Análise microbiológica | 53 |
| 6. DISCUSSÕES..... | 54 |
| 7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES | 57 |
| 8. SUGESTÃO DE TRABALHO FUTURO | 58 |
| REFERÊNCIAS | 59 |

1. INTRODUÇÃO

A Usina de Bioenergia e Biofertilizantes com Resíduos Orgânicos, localizada no Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo - CUASO, foi implementada em 2021. A Usina é constituída por 3 biorreatores de 430 m³ cada, sendo 2 aquecidos para digestão principal e 1 para digestão complementar e armazenamento de digestato. Nos tanques reatores, que operam em temperatura mesófila (principalmente entre 30 e 35 °C), é realizada a digestão anaeróbia de resíduos alimentares e podas por meio de microrganismos, com produção de biogás e, ao final do processo, que perdura por 30 dias, é produzido o digestato (D'AQUINO, 2020).

O digestato é um material composto de baixa carga orgânica, contendo macro e micronutrientes para o solo. Segundo Lu e Xu (2021), o digestato possui na sua composição elementos essenciais ao solo, porém é necessário um processo de tratamento, seja ele físico ou químico, para que haja um melhor aproveitamento dos nutrientes. Segundo Guilayn *et al.* (2019), o digestato pode ser separado pela fase líquida e pela fase sólida. Essa separação é um pós-tratamento, e, dependendo de condições específicas, pode contribuir para melhorar a qualidade do produto e atender condições regulatórias para uso como biofertilizante.

A composição do digestato, obtido a partir de resíduos alimentares, apresenta uma composição química variada, já que cada local tem suas particularidades, sejam as condições sócio-culturais e econômicas (CESARO, 2021). Os principais componentes a serem considerados são o Nitrogênio, Fósforo, Potássio além de outros elementos, que servem de nutrientes para as plantas. Dessa forma, aumenta a produção agrícola com um melhor desenvolvimento vegetativo e ainda pode ser utilizado como defensivo natural (MATOS, 2016).

A viabilidade e a sustentabilidade do processo de digestão anaeróbia estão relacionadas com a gestão do digestato, que comumente é utilizado diretamente no solo por conter nutrientes na sua composição (YU *et al.*, 2021). Entretanto, as necessidades sazonais agrícolas, o custo de transporte e a aceitação do mercado são os principais obstáculos no manejo (PENG; PIVATO, 2019).

O Brasil está entre os quatro maiores consumidores de fertilizantes no mundo, sendo que mais da metade é proveniente do mercado internacional (BRASIL, 2022a). Nesse contexto, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) estabeleceu em 2021 o Plano

Nacional de Fertilizantes (PNF) (BRASIL, 2021) com o objetivo de alavancar nacionalmente as políticas de competitividade da produção e distribuição de fertilizantes de forma sustentável.

O processo de reaproveitamento de resíduos orgânicos via biodigestão é capaz de demonstrar um pacote tecnológico de serviços energéticos e ambientais, pois reduz a quantidade de resíduos orgânicos encaminhados para o aterro sanitário e produz digestato.

O presente trabalho tem relevância para demonstrar o fechamento do ciclo de reuso e reciclagem de materiais propiciado pela Usina, caracterizando seu digestato. Há carência de dados sobre o digestato de resíduos alimentares, fonte de biomassa que não é reaproveitada em território brasileiro em larga escala. Há apenas dados em pequena escala com o HomeBiogas™ 2.0 (MACHADO, 2021) e um escala laboratorial (SIMON, 2020), o que não trata do digestato em larga escala como da Usina de Bioenergia do IEE.

2. OBJETIVOS

O objetivo do presente trabalho é a caracterização do digestato proveniente da biodigestão de resíduos de alimentos e podas da Usina de Bioenergia e Biofertilizantes do Instituto de Energia e Ambiente (IEE) da Universidade de São Paulo.

Objetivos específicos

Os objetivos específicos para a elaboração do presente estudo são:

- a) Analisar a variabilidade das características físico-químicas e biológica do digestato nos 500 primeiros dias de operação da Usina;
- b) Avaliar a concentração de nutrientes nas fases líquida e sólida após separação do digestato por sedimentação;
- c) Avaliar a concentração de nutrientes nas fases líquida e sólida após separação do digestato por centrifugação;
- d) Analisar a utilização do digestato sem pré-tratamento.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nessa seção, são apresentados os processos da Usina de Bioenergia e Biofertilizante com Resíduos Orgânicos do IEE, as legislações e normas acerca do uso de digestato para fins agrícolas e as características típicas do digestato de acordo com a literatura.

3.1. Descrição do processo da Usina de Bioenergia e Biofertilizantes com resíduos orgânicos

A Usina de Bioenergia e Biofertilizantes com resíduos orgânicos, instalada no Instituto de Energia e Ambiente (IEE) da USP, tem como principal objetivo permitir o estudo e a avaliação de um pacote tecnológico de fornecimento de serviços de adequação ambiental e serviços energéticos. Essa demonstração ocorre por meio da decomposição anaeróbia do resíduo e produção de biogás, que se qualifica como uma fonte de energia limpa, renovável e estocável. Dentre os produtos possíveis com o biogás como matéria prima, pode-se realizar a produção de energia elétrica e biometano. O digestato, resultado da decomposição dos resíduos, pode ser também ofertado como produto, caso adequado, e utilizado como biofertilizante.

Segundo D'Aquino (2020), a quantificação e caracterização dos resíduos produzidos no Campus CUASO apresentou o potencial de geração média de 92 toneladas mensais de resíduos orgânicos no Campus, sendo aproximadamente 30% concentrados nos 4 restaurantes geridos pela Superintendência de Assistência Social (SAS) da USP. Outro resíduo gerado em grande quantidade são restos de podas e folhagem de arbustos e árvores. Na USP são coletados aproximadamente 22.774,125 m³ de resíduos de podas por ano. A planta foi projetada para operar com resíduos alimentares e resíduos de poda provenientes das áreas verdes do campus da USP e para processar resíduos orgânicos provenientes da agroindústria e resíduos alimentares externos.

A Figura 1 apresenta a Usina estruturada em quatro unidades principais: (i) a unidade de recepção e produção de biogás e biofertilizante, (ii) a unidade de produção de bioeletricidade e calor, (iii) a unidade de produção de biometano e (iv) a unidade de monitoramento, operação e controle. As unidades foram projetadas para trabalhar como um laboratório de pesquisa e desenvolvimento em escala industrial, permitindo estudos avançados nas áreas de bioenergia, biogás, biofertilizantes e outras aplicações relacionadas.

Figura 1 – 3 biorreatores da Usina de Bioenergia e Biofertilizante com Resíduos Orgânicos do IEE.



Fonte: (CPLEN, 2021).

A unidade de recepção de resíduos e produção de biogás e biofertilizante recebe os resíduos através de um sistema de moega de recepção, trituração e homogeneização. A capacidade de processamento diário é de 43,5 toneladas de resíduos, totalizando 15.870,2 toneladas por ano. O processo de produção de biogás ocorre em três (03) biorreatores de 430 m³ cada, que podem ser operados em série ou paralelo. Todos os tanques são equipados com agitadores helicoidais, instalados na lateral dos tanques e acima do tanque há uma cúpula de dupla membrana para armazenamento do biogás produzido.

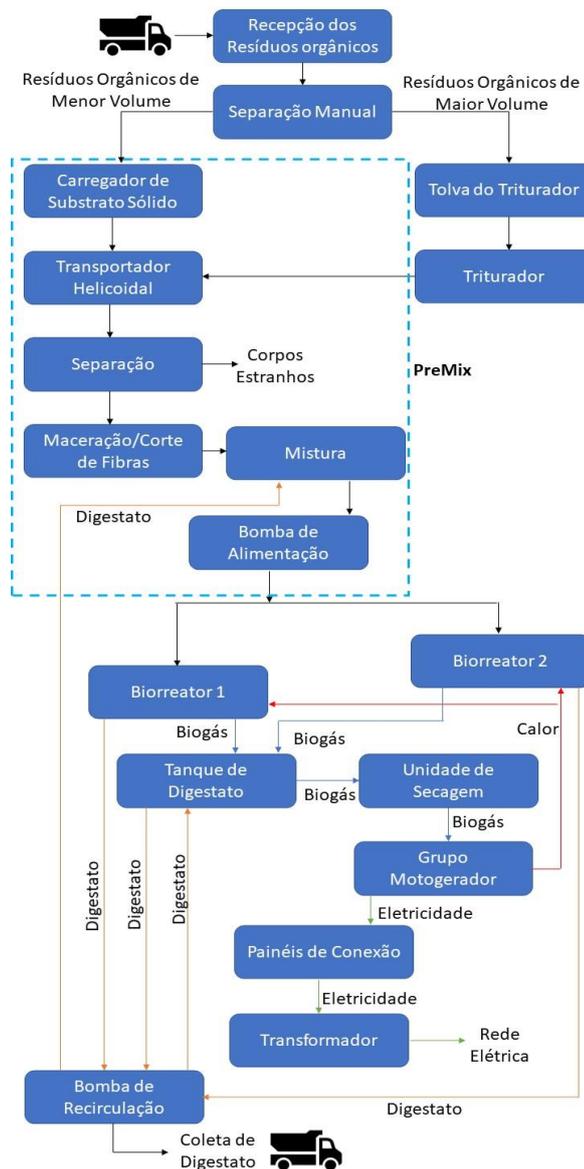
Os gasômetros de armazenamento estão interconectados e contam com tubulação para alimentação das unidades de limpeza e secagem do biogás e unidade de cogeração, bem como com o *flare*. Para fins de pesquisa, foram adicionados pontos de acesso para inserção de sistemas de medição e monitoramento dos parâmetros dos processos bioquímicos e físicos nos pontos das diferentes zonas e alturas do reator.

A geração de energia elétrica e calor é realizada em conjunto motogerador e, para tanto, o primeiro processo é a secagem e limpeza, dada a natureza úmida do biogás e a necessidade de remoção de impurezas presentes. A desumidificação funciona como uma condensadora onde o biogás é resfriado a uma temperatura pré-estabelecida e o condensado é retirado através da purga. Após o biogás passar pela unidade de secagem, ele é conduzido para dessulfurização para a retirada de H₂S remanescente através da adsorção em carvão ativado. A unidade conta com 01 (um) motogerador de potência instalada de 75kW_e, equipado com sistema de cogeração

e o calor produzido pelo motor é utilizado no sistema de trocador de calor, e a água aquecida é enviada para o sistema de serpentina interna dos tanques para aquecimento dos biorreatores.

Todas as unidades produtivas listadas contam com instrumentação e automação para o controle dos processos. A estabilidade das unidades de produção de biogás e bioeletricidade dependem do adequado controle, o qual se obtém por meio de um sistema de monitoramento capaz de detectar uma instabilidade. O controle deve ser robusto e eficiente para detecção de instabilidade e, caso detectada a instabilidade, a informação deve chegar ao próprio sistema para atuação das correções necessárias ou ao operador do sistema. Os processos da operação da Usina estão apresentados na Figura 2.

Figura 2 - Processos da Usina de Bioenergia e Biofertilizantes com Resíduos Orgânicos.



Fonte: Adaptado de Sistema de Biodigestão Anaeróbica – Descrição da Operação (CPLEN, 2022).

3.2. Uso de fertilizantes

Segundo o Decreto Federal nº 4.954 de 2004 (BRASIL, 2004), fertilizante é “substância mineral ou orgânica, natural ou sintética, fornecedora de um ou mais nutrientes às plantas”. Ele pode ser classificado como: mineral misto, mineral complexo, orgânico simples, orgânico misto, orgânico composto e organomineral. A partir dessas classificações pode haver variações de acordo com as suas combinações.

Os fertilizantes são compostos por elementos químicos considerados nutrientes essenciais capazes de fornecer uma melhor fertilidade ao solo e, conseqüentemente, maior produção agrícola. Ou seja, é necessário que haja uma fonte de nutrientes para o crescimento das plantas desde o início até o fim. Essa otimização de produção agrícola é baseada numa aplicação do produto em uma menor área possível, onde utilizará a menor quantidade de recursos (REETZ JR., 2016).

Os nutrientes podem ser classificados como macronutrientes e micronutrientes. De acordo com o Decreto Federal nº 4.954, os macronutrientes são Nitrogênio, Fósforo, Potássio, Cálcio, Magnésio e Enxofre; e os micronutrientes são Boro, Cloro, Cobalto, Cobre, Ferro, Manganês, Molibdênio, Níquel, Selênio, Silício e Zinco. Esses nutrientes são fundamentais para o desenvolvimento da planta porque fazem parte da multiplicação celular: o Nitrogênio é um componente do citoplasma, enzimas e coenzimas da planta; o Fósforo possui a função de armazenar e fornecer energia; o Potássio auxilia na hidratação, armazenamento de energia, respiração celular, síntese de amido e proteínas (MALAVOLTA, 1981).

Os dejetos de animais e resíduos de colheitas/podas eram utilizados como adubos e fontes de nutrientes (PINTO et al., 2014), sendo uma forma de aumentar a produtividade agrícola. Além disso, outro método de melhora eram as rotações de cultura com leguminosas e entre outros procedimentos até ser descoberto o processo chamado de *Haber-Bosch* (MALAVOLTA, 1981). Esse processo, em 1913, passou a sintetizar amônia em larga escala e até hoje é utilizado para produção de fertilizantes nitrogenados.

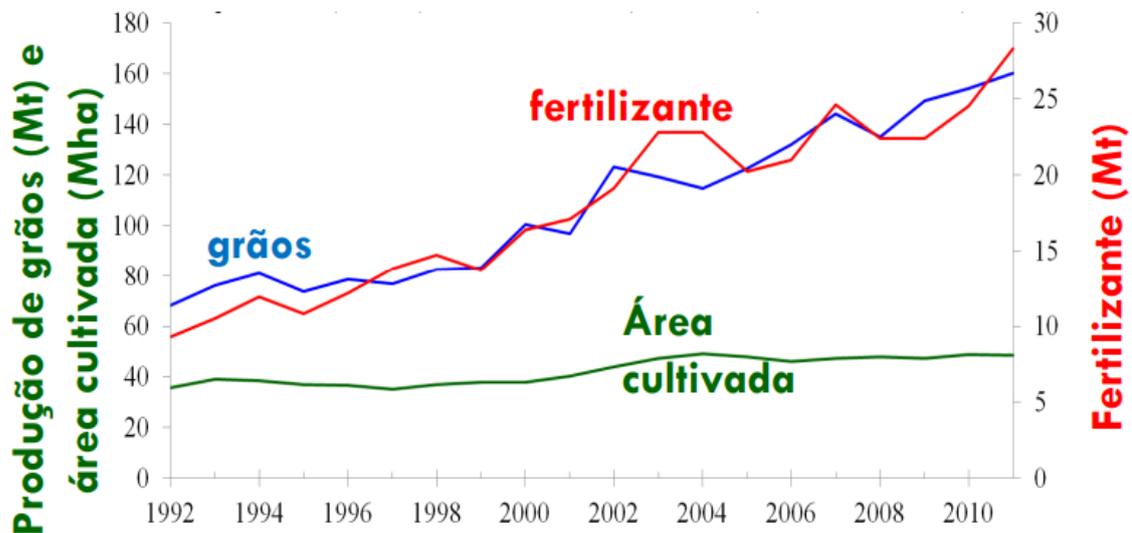
Tecnicamente, o processo *Haber-Bosch* utiliza o Nitrogênio e o Hidrogênio nos estados gasosos e, através do controle de pressão e temperatura, é produzida a amônia (CHAGAS, 2007; SMIL, 2002). Segundo Malavolta (1981), no primeiro ano de produção, a *Badische Anilin Soda Fabrik* (BASF) produziu 750 toneladas de amônia, o que é possível,

atualmente, ser produzido em menos de um dia. A amônia (NH₃) é uma molécula fundamental para produzir diversos tipos de fertilizantes.

Para o uso mais eficiente de fertilizantes, é utilizada uma ferramenta de estratégia chamada 4R: *right source, right rate, right time e right place*. O *right source* é referente ao nutriente que está sendo disposto, podendo ser mais efetivamente absorvido ou não; o *right rate* refere-se à melhor concentração de fertilizante que deve ser aplicada de forma que a planta consiga absorver; o *right time* refere-se sobre a disposição do fertilizante no momento certo, ou seja, na melhor fase de crescimento da planta; o *right place* trata-se de aplicar no local correto da planta, onde irá absorver mais os nutrientes. Esses 4 fatores visam atingir a união da produtividade, sustentabilidade, lucratividade e proteção ambiental (MIKKELSEN, 2011).

Em um contexto brasileiro, o país vem mostrando que sua produção agrícola cresce conjuntamente com o aumento do uso de fertilizantes. Por outro lado, a área de plantação não apresenta aumento significativo, conforme pode ser observado na Figura 3. Segundo o MAPA, cerca de 85% do total de fertilizantes utilizados é dependente de importação, na Figura 5 é possível visualizar a maioria de insumos importados, portanto, neste cenário é visto que ao ter essa dependência do mercado internacional, o setor da agricultura pode enfrentar instabilidades (BRASIL, 2022a)

Figura 3 – Relação de uso de fertilizantes com produção de grãos e área destinada para plantação entre os anos de 1992 e 2010.

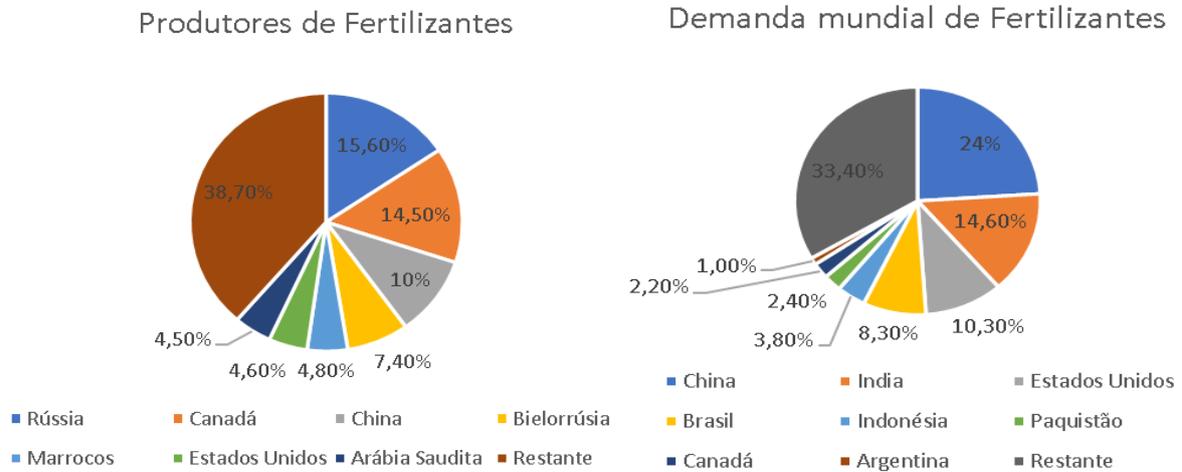


*Referente às plantações de soja, milho, cana, eucalipto, pinus e pasto.

Fonte: Associação Nacional para Difusão de Adubos (CANTARELLA, 2018)

De acordo com os gráficos apresentados na Figura 4, os quatro maiores produtores de fertilizantes são Rússia, Canadá, China, Bielorrússia e os quatro maiores consumidores são China, Índia, Estados Unidos e Brasil (CALZADA; D'ANGELO, 2006).

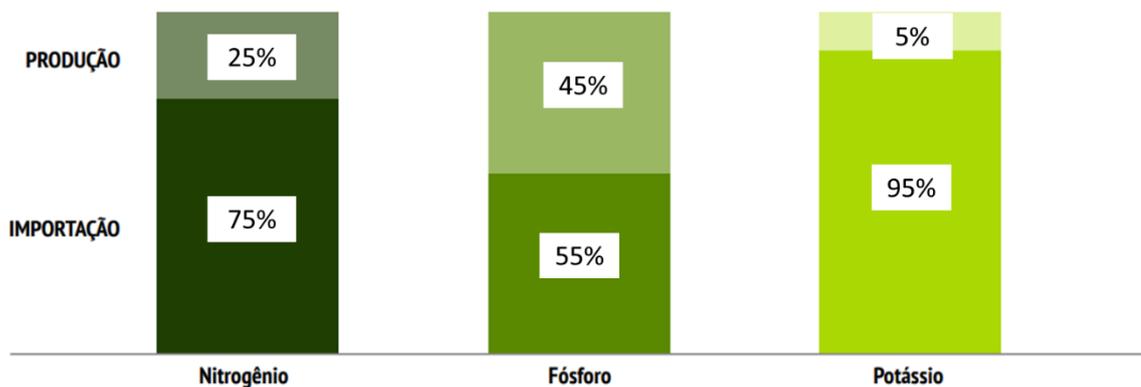
Figura 4– Representação gráfica da produção e demanda mundial de fertilizantes do ano de 2018.



Fonte: Adaptado de Calzada e D'Angelo (2006).

A origem de fertilizantes consumidos no Brasil, é representada na Figura 5, diferenciando a quantidade importada e a de origem nacional. Dos 95% de potássio importados, mais da metade é de origem da Rússia e da Bielorrússia (ANDA, 2022).

Figura 5- Representação gráfica de consumo de fertilizantes importados no Brasil.



Fonte: Adaptado de ANDA (2022).

Anteriormente, em 2007, também houve uma crise de fertilizantes com o aumento do valor de insumos (BENITES; POLIDORO; RESENDE, 2010). Dessa forma, foi vista pelo

Governo Federal do Brasil a necessidade de se ter autonomia em relação ao comércio exterior, dando assim abertura aos bioinsumos e outras possíveis tecnologias (BRASIL, 2022a).

3.2.1 Tipos de fertilizantes

A classificação dos fertilizantes comerciais, de acordo com a legislação, pode ser elencada em:

- 1) Fertilizante simples,
- 2) Fertilizantes mistos,
- 3) Complexos,
- 4) Fertilizantes com macronutrientes secundários,
- 5) Fertilizantes com micronutrientes,
- 6) Fertilizantes orgânicos e
- 7) Corretivos.

Os fertilizantes simples podem ser subdivididos em minerais, fosfatados e potássicos (Tabela 1). Dentre os fertilizantes orgânicos podem-se elencar os de origem animal, origem vegetal e origem mista, como é o caso dos resíduos.

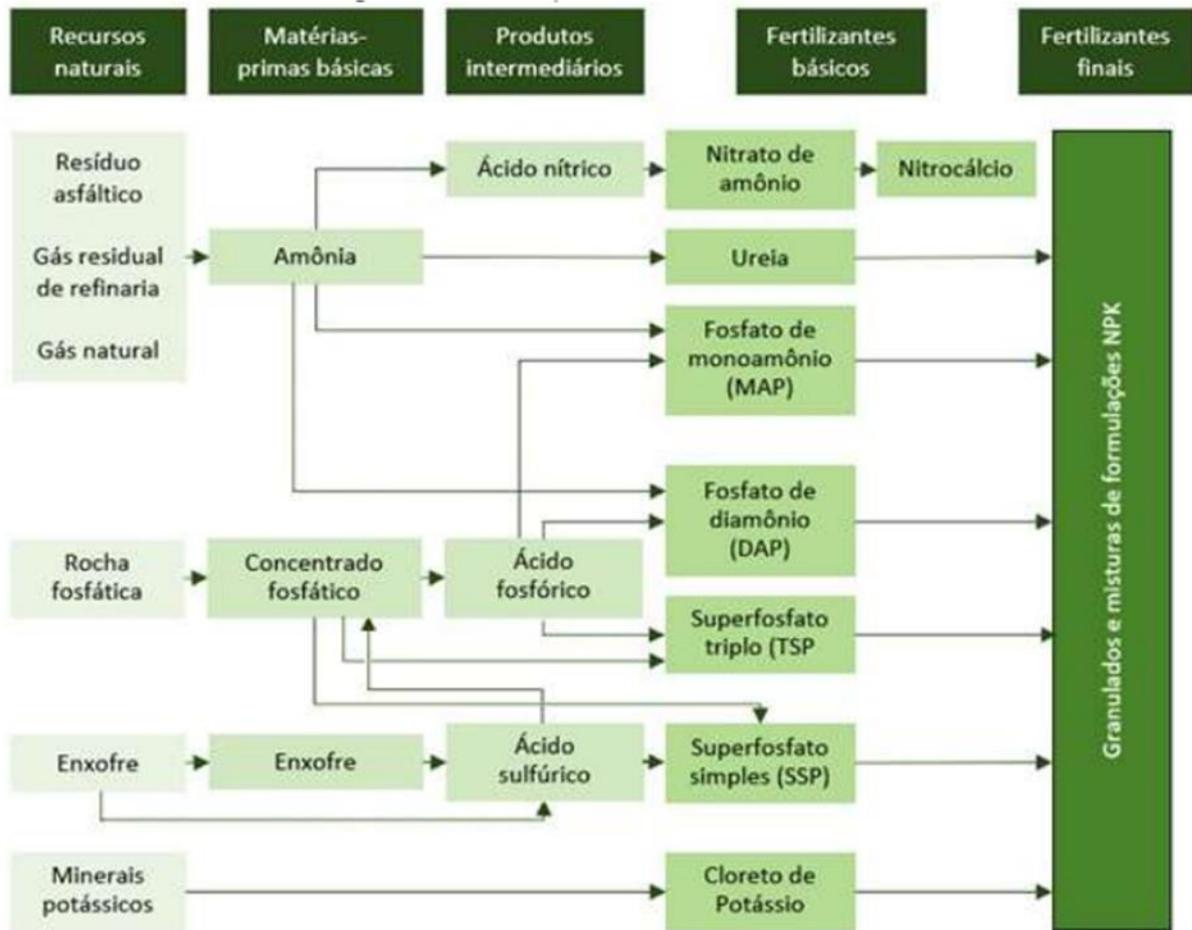
Os fertilizantes são produzidos a partir de matérias-primas, como, o gás natural, gás liquefeito de petróleo, hidrogênio eletrolítico, rochas e minerais (MALAVOLTA, 1981). Na Figura 6, é possível visualizar a cadeia de produção de fertilizantes, sendo o NPK a base para os fertilizantes. O diferencial está associado à concentração de cada nutriente no produto final. A Tabela 2, apresenta a função e a forma de absorção desses elementos no desenvolvimento vegetativo da planta.

Tabela 1 – Classificação de fertilizantes comerciais.

| | | |
|--|--|---|
| Fertilizantes mistos | Nitrofosfatados | |
| | Nitropotássicas | |
| | Fosfo-potássicos | |
| Complexos | Nitro-fosfo-potássicos | |
| | nitro-fosfatados | |
| | nitro potássicos | |
| | fosfo potássicos | |
| Fertilizantes com macronutrientes secundários | Cálcicos | Superfosfatos, nitrofosfatos, escória e termofosfatos, farinhas de ossos, fosfaritas, apatitas, gesso, nitrato de cálcio, calnitro e nitrocálcio, nitrossulfocálcio |
| | Magnesianos | Termofosfatos, sulfo-potássico-magnesianos, sulfato de magnésio |
| | Sulfo-cálcicos | Superfosfatos simples e concentrado, gesso, nitrossulfocálcio, nitrossulfo-fosfatos |
| | Sulfo magnesianos | Sulfato de magnésio, sulfo-potássio-magnesianos |
| Fertilizantes com micronutrientes | Óxidos, ácidos, sais, | |
| | quelados naturais e sintéticos e fritos. | |

Fonte: Malavolta (1981)

Figura 6 - Cadeia de produção de fertilizantes.



Fonte: (BRASIL, 2021, p. 15).

Tabela 2 - Funções do NPK e suas formas de absorção.

| Elemento | Função | Forma de absorção |
|-----------------|--|--|
| Nitrogênio | <ul style="list-style-type: none"> - Síntese de clorofila, que está ligado ao processo de fotossíntese; - Componente de vitaminas, aminoácidos, proteínas, e do sistema enzimático; | Amônio (NH ₄ ⁺) e nitrato (NO ₃) |
| Fósforo | <ul style="list-style-type: none"> - Auxilia nos processos moleculares: fotossíntese, respiração e divisão celular, armazenamento e transferência de energia; - Fundamental para formação de sementes; - Aumenta a resistência da planta no inverno; - Fortalece o vegetal: resistência ao inverno, fortalecimento das raízes, resistência às doenças, acelera a maturidade, | Íon ortofosfato primário (H ₂ PO ₄), íon ortofosfato secundário (HP) e ortofosfato (PO ₄) |
| Potássio | <ul style="list-style-type: none"> - Auxilia no metabolismo vegetal, participando na fotossíntese e, conseqüentemente, na respiração celular; - Participa da síntese proteica; - É essencial para o fechamento e abertura dos estômatos; - Aumenta a resistência da cultura em invernos rigorosos. | K ₂ O |

Fonte: Manual Internacional de Fertilidade (LOPES, 1998) e Malavolta (1976, 1981)

3.2.2. Biofertilizantes

A definição de biofertilizantes, segundo o MAPA (2020), é:

Produto que contém princípio ativo ou agente orgânico, isento de substâncias agrotóxicas, capaz de atuar, direta ou indiretamente, sobre o todo ou parte das plantas cultivadas, elevando a sua produtividade, sem ter em conta o seu valor hormonal ou estimulante.

Os biofertilizantes podem ser divididos em: aminoácidos, biofertilizante de substâncias húmicas, biofertilizante de extratos de algas ou algas processadas, biofertilizante de extratos vegetais, biofertilizante composto (mistura de dois ou mais tipos de biofertilizantes), entre outros. São obtidos pela decomposição de material orgânico (processo aeróbio ou anaeróbio),

podendo conter microrganismos vivos ou não (presença de células latentes). Os biofertilizantes tem se constituído como uma alternativa ao fertilizante sintético e tem se tornado uma prática na agricultura brasileira no intuito de aumentar a produção orgânica (BONFIM, 2016). Por conter certos microrganismos que são benéficos, é considerado também como um bioestimulante, auxiliando as bactérias da raiz da planta a capturar o nitrogênio (BRASIL, 2021, p. 63).

3.3. Legislação Brasileira e Normativas

Para que o digestato seja comercializado como biofertilizante, deve-se levar em consideração as legislações de acordo com a composição do material. As legislações passam pelas esferas federal, estadual e municipal.

A partir da Lei nº 6.894/1980 (BRASIL, 1980), que dispõe sobre a inspeção e a fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, estimulantes ou biofertilizantes, e em seguida do Decreto nº 86.955, de 18 de fevereiro de 1982 (BRASIL, 1982), os biofertilizantes foram inseridos na legislação, viabilizando seu uso e comercialização. Outras normativas e decretos foram emitidos a fim de viabilizar a utilização dos biofertilizantes, assim como procedimentos para utilização de diversas fontes orgânicas como fertilizantes.

A Lei nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980 (BRASIL, 1980), alterada pela Lei 12.890 de 2013 (BRASIL, 2013), tem seu regulamento aprovado pelos Decreto nº 4.954 de 14 de janeiro de 2004 (BRASIL, 2004) e Decreto nº 8.384 de 2014 (BRASIL, 2014), os quais permitem a inspeção e fiscalização da produção e comercialização de fertilizantes, corretivos, inoculantes ou biofertilizantes, remineralizadores e substratos. Subsequente aos decretos, diversas Instruções Normativas (IN) foram publicadas pelo Ministério da Agricultura e Pecuária - MAPA, a fim de detalhar as leis e decretos anteriores. A Tabela 2 apresenta o resumo da legislação pertinente, em âmbito nacional e considerando a legislação do Estado de São Paulo.

Tabela 3 - Legislação pertinente ao uso de biofertilizantes.

| Legislação | Descrição |
|----------------------------------|--|
| Lei nº 6.894/1980 (BRASIL, 1980) | Dispõe sobre a inspeção e a fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, estimulantes ou biofertilizantes, remineralizadores e substratos para plantas, destinados à agricultura, e dá outras providências. |

| | |
|--|--|
| Decreto nº 86.955, de 18 de fevereiro de 1982 (BRASIL, 1982) | Dispõe sobre a inspeção e a fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, estimulantes ou biofertilizantes destinados à agricultura |
| Decreto Federal MAPA nº 4954/2004 (BRASIL, 2004) | Regulamenta a Lei Federal nº 6894/1980- dispõe sobre a inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, ou biofertilizantes, remineralizadores e substratos para plantas destinadas à agricultura. |
| IN MAPA nº 27/2006 (BRASIL, 2006a) | Estabelece limites no que se refere às concentrações máximas admitidas para agentes fitotóxicos, patogênicos ao homem, animais e plantas, metais pesados tóxicos, pragas e ervas daninhas. |
| IN MAPA nº 25/2009 (BRASIL, 2006a) | Aprova as normas sobre as especificações e as garantias, as tolerâncias, o registro, a embalagem e a rotulagem dos fertilizantes orgânicos simples, mistos, compostos, organominerais e biofertilizantes destinados à agricultura. |
| IN MAPA nº 61/2009 (BRASIL, 2020b) | Estabelece as regras sobre definições, exigências, especificações, garantias, tolerâncias, registro, embalagem e rotulagem dos fertilizantes orgânicos e dos biofertilizantes, destinados à agricultura. |
| RESOLUÇÃO Nº 498, de 19 de agosto de 2020 (BRASIL, 2020a) | Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biofertilizante em solos, e dá outras providências. |

Dentre as Instruções Normativas, destacam-se as IN nº 27 de 05 de junho de 2006 (BRASIL, 2006a) e a IN nº 61 (BRASIL, 2020b). A IN nº 27, com as alterações da IN SDA 07 de 12 de abril de 2016, estabelece os limites de concentrações máximas admitidas para agentes fitotóxicos, patogênicos ao homem, animais e plantas, metais pesados tóxicos, pragas e ervas daninhas para produzir, importar ou comercializar fertilizantes, biofertilizantes, corretivos e inoculantes, estas apresentadas na Tabela 3. Já a IN nº 61 menciona que, para fertilizantes orgânicos de natureza fluida, o Carbono Orgânico (CO) deve ter concentração mínima de 3%, os teores de NPK de 1% e os micronutrientes primários, conforme declarado no registro do produtor/importador, detalhados em sua subseção IV.

O texto da IN 61 (BRASIL, 2020b), apresenta as normas para que um material seja utilizado e comercializado como biofertilizante no território brasileiro. Nesse documento, estão estabelecidas as características físico-químicas do material, como, concentração de nutrientes, granulometria e, se forem caso de comercialização, como deve ser a embalagem e rotulagem, na qual os nutrientes devem ser expressos na seguinte forma:

- a) macronutrientes primários: Nitrogênio (N), Fósforo (P₂O₅) e Potássio (K₂O);

- b) macronutrientes secundários: Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e Enxofre (S);
 c) micronutrientes: Boro (B), Cloro (Cl), Cobalto (Co), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Manganês (Mn), Molibdênio (Mo), Níquel (Ni), Selênio (Se), Silício (Si) e Zinco (Zn);

Tabela 4 - Valores limites instruídos na IN 27 de 2006.

| Contaminante | Valor máximo permitido | Unidade de medida |
|----------------------------|---------------------------------------|--------------------------|
| Arsênio (mg/kg) | 20 | |
| Cádmio (mg/kg) | 3 | |
| Chumbo (mg/kg) | 150 | |
| Cromo hexavalente (mg/kg) | 2 | mg/kg |
| Merúrio (mg/kg) | 1 | |
| Níquel (mg/kg) | 70 | |
| Selênio (mg/kg) | 80 | |
| Coliformes termotolerantes | 1.000,00 | NMP/g de MS |
| Ovos viáveis de helmintos | 1 | nº em 4g ST |
| Salmonella | Ausência em 10 gramas de matéria seca | |
| Materiais inertes | Vidros, plásticos, metais < 2 mm | 0,5% na massa seca |
| | Pedras > 5 mm | 5% na massa seca |

MS: Massa Seca; NMP: Número Mais Provável; ST: Sólidos Totais Fonte: MAPA (BRASIL, 2006b).

Quanto à utilização de outras fontes orgânicas, a Resolução CONAMA nº 375, em 29 de agosto de 2006 (BRASIL, 2006b), expõe os critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados. É apresentado que o material resultante de esgoto possui matéria orgânica e nutrientes que trazem benefícios para a agricultura, porém precisa cumprir as concentrações limites máximas dos contaminantes descritos na Tabela 3 acima. A Resolução nº 498 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) de 2020, também dispõe de procedimentos sobre como o material proveniente de lodo de esgoto sanitário pode ser disposto no solo (BRASIL, 2020a).

A Resolução CONAMA nº 375 (BRASIL, 2006b) são apresentados os agentes patogênicos de interesse e suas respectivas quantidades máximas permitidas para a utilização de lodos de esgoto sanitário, conforme pode ser observado na Tabela 5. A classe A pode ser utilizada em qualquer cultura e a classe B é restrita apenas para as culturas de café, silvicultura, produção de fibras e óleos.

Tabela 5 - Concentração máxima de patógenos permitida pela Resolução 375 do CONAMA.

| Tipo de lodo de esgoto ou produto derivado | Concentração de patógenos |
|--|---|
| A | Coliformes Termotolerantes 10^3 NMP/ g de ST |
| | Ovos viáveis de helmintos $0,25$ ovo/ g de ST |
| | Salmonella ausência em 10 g de ST |
| | Vírus $0,25$ UFP ou UFF 1 g de ST |
| B | Coliformes Termotolerantes 10^6 NMP/ g de ST |
| | Ovos viáveis de helmintos 10 ovos/ g de ST |

NMP: Número Mais Provável; ST: Sólidos Totais; UFF: Unidade Formadora de Foco; UFP: Unidade Formadora de Placa.

Fonte: BRASIL(2006b).

Em âmbito estadual, para o uso de efluente e lodos fluidos de indústrias cítricas para fins agrônômicos, há uma norma da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), o P4.002 publicada em 2010 (SÃO PAULO, 2010), com atualização em 2019. Esse documento tem como objetivo “estabelecer os critérios e procedimentos para o armazenamento e aplicação de efluentes e lodos fluidos gerados pelas indústrias de processamento de frutas cítricas” (SÃO PAULO, 2019). Nota-se nesse documento a menção das concentrações limites de sódio, cálcio e magnésio. Esses elementos determinam, em uma equação matemática (1), demonstrada abaixo, a Razão de Adsorção de Sódio (RAS), para o qual o valor máximo permitido de é de 12.

$$RAS = \frac{[Na^+]}{\sqrt{([Ca] + [Mg])/2}} [(mmol/L)^{-1/2}], \text{ Equação 1}$$

onde as concentrações de Na^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} estão na unidade de mmol/litro.

O RAS deve ser relacionado à condutividade elétrica (C.E.) do material. A Tabela 6 correlaciona os valores de RAS e de C.E.

Tabela 6 - Limites dos valores de RAS de acordo com a Condutividade Elétrica.

| RAS | Condutividade Elétrica (dS/m) | |
|--------|-------------------------------|--------|
| | Mínima | Máxima |
| 0 - 3 | 0,2 | 2,9 |
| 3 - 6 | 1,2 | 2,9 |
| 6 - 12 | 1,9 | 2,9 |

Fonte: Adaptado de CETESB (2019).

A Norma Técnica P4.002 também orienta que a caracterização dos efluentes e lodos fluidos deve incluir a medição de parâmetros como carbono orgânico total, fósforo total, série nitrogenada (N-Kjeldahl, N-amoniacal, N-nitrato, N-nitrito), pH, potássio, sódio, enxofre total, cálcio, magnésio, teor de sólidos, bário, cádmio, chumbo, cobre, cromo, mercúrio, níquel, zinco e, caso haja mistura com esgoto sanitário, coliformes termotolerantes, ovos viáveis de helmintos e Salmonella (SÃO PAULO, 2019).

Quanto ao digestato produzido em biodigestores, o Instituto do Meio Ambiente de Santa Catarina (IMA) publicou a Instrução Normativa (IN) nº 11 (SANTA CATARINA, 2021), que dispõe de dados da Resolução nº 237 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) (BRASIL, 2005), combinadas com a Lei nº. 14.675/09 do Estado de Santa Catarina (SANTA CATARINA, 2009). Na IN 11, são encontradas, de forma detalhada, as licenças e relatórios ambientais de como pode ser armazenado o dejetos suíno e como pode ser utilizado no solo. Tendo o solo e a região de Santa Catarina suas características próprias, o documento apresenta a quantidade que pode ser disposta no solo.

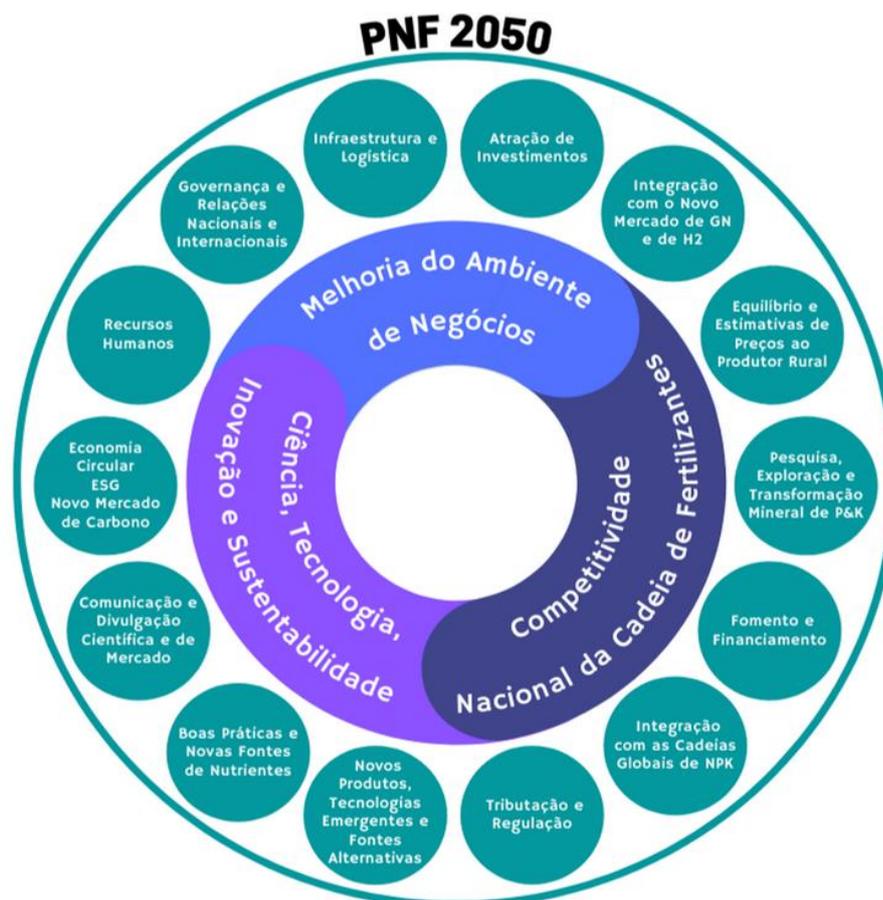
A instrução IN 11 de IMA é o único documento que menciona a palavra digestato no objetivo.

Definir a documentação necessária ao licenciamento e estabelecer critérios para apresentação dos planos, programas e projetos ambientais para implantação de atividades relacionadas à suinocultura de pequeno, médio e grande porte, incluindo tratamento de resíduos líquidos, tratamento e disposição de resíduos sólidos, emissões atmosféricas, ruídos e outros passivos ambientais.

3.4. Regulação para uso de digestato e incentivos

Os fertilizantes orgânicos e organominerais, além da regulação específica, necessitam de fomento para que seu mercado possa se expandir e novas tecnologias possam ser empregadas para sua comercialização. Em 2022, foi publicado o Decreto Nº 10.991 (BRASIL, 2022b), o qual institui o Plano Nacional de Fertilizantes 2022-2050 e o Conselho Nacional de Fertilizantes e Nutrição de Plantas (BRASIL, 2021). Nesse Plano são encontradas algumas diretrizes que estimulam a produção de fertilizantes em território nacional, como, a ampliação de investimentos em pesquisa, desenvolvimento e inovação para produção e distribuição de fertilizantes. É possível notar que o plano descreve a importância dos fertilizantes orgânicos e organominerais, evidenciando sua capacidade de melhoria da saúde do solo e de sequestro de carbono. A Figura 7 apresenta os objetivos do PNF, que é um processo complexo envolvendo diversos setores e conta com a colaboração destes para que seja alcançado o objetivo.

Figura 7 - Representação do Plano Estratégico do PNF.



Fonte: Brasil (2021).

Os fertilizantes orgânicos (FO) estão inseridos no plano, assim como os fertilizantes Organominerais (FOM), definidos como produtos de natureza fundamentalmente orgânica, obtido por processo físico, químico, físico-químico ou bioquímico, a partir de matérias-primas de origem industrial, urbana ou rural, vegetal ou animal, enriquecido de nutrientes minerais. A reciclagem de matéria orgânica como insumo para produção de fertilizantes tem aumentado, sobretudo, pelo tratamento de resíduos gerados nas criações confinadas de animais e nas usinas do lixo municipal, onde o Brasil ocupa a 13ª posição dentre os 15 principais países com patentes depositadas para essa tecnologia (BRASIL, 2021).

A participação dos fertilizantes orgânicos e fertilizantes organominerais no Plano, se baseia no argumento da produção inferior de fertilizante sem relação à demanda e para esse cenário, o segmento surge como alternativa para a correção de deficiências estruturais do solo brasileiro e a diminuição da dependência internacional (BRASIL, 2021). O texto ainda cita que o mercado de FOM cresceu 19,5% em 2019 e que os organominerais necessitam de apoio do

Governo Federal para ganhar escala, bem como necessidade de adaptação do arcabouço regulatório, para os quais há a necessidade da integração dos fertilizantes organominerais e orgânicos com a cadeia "tradicional".

3.5. Caracterização de digestato do processamento de resíduos alimentares

O digestato é amplamente utilizado como biofertilizante por conter nutrientes para o solo, porém torna-se necessário avaliar a concentração desses componentes, além de verificar a presença e concentração de patógenos (GUILAYN et al., 2019, 2020). Nesse contexto, a caracterização físico-química e biológica do digestato fornece informações acerca de sua composição a fim de verificar sua utilização na agricultura, de acordo com a legislação vigente do país. Na Tabela 6 estão apresentados alguns estudos que avaliaram a composição do digestato de resíduos orgânicos sem tratamento.

Singh et al. (2022) trabalha com o digestato bruto e suas frações líquida e sólida. Entre as diferenças de fases destaca-se a maior concentração de fósforo na fase sólida do digestato. A relação C/N também é maior na fase sólida, pois o carbono orgânico está mais presente nessa fração.

Tabela 7– Características do digestato de resíduos alimentares sem tratamento.

| Composição físico-química | Singh et al.(2022) | Peng e Pivato (2019) OFMSW | Peng e Pivato (2019) FW | Weimers (2022) | Jimenez et al (2020) FFMSW_1 | Jimenez (2020) FFMSW_2 | Jimenez (2020) BW | Machado (2022) * |
|----------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|-------------------------------|--------------------------|-------------------------|
| pH | 7,3 | 8,30 | 7,60 – 8,30 | 8,1 | n.a. | n.a. | n.a. | 7,22 |
| Sólidos Totais (ST) (%) | 1,5 - 13,2 | 0,72 – 51,2 | 1,99 – 7,88 | 2,5 | 19,7 | 53,3 | 24,9 | 0,49 |
| Sólidos Voláteis (SV) (%) | 63,8 - 75 | 62,1 | 61,7 – 73,6 | n.a. | 48,7 | 41,8 | 79,0 | 0,28 |
| Nitrogênio Total (g/kg) | 3,1 - 14 | 2,79 – 14 | 4,15 | 5,3 | 17,78 -22,20 | 13,61 – 15,39 | 29,79 – 30,89 | 0,349 |
| NH ₄ -N (g/kg) | 15,0 – 68,0 | n.a. | n.a. | 3,7 | 10,5 | 0,04 | 27,68 | n.a. |
| Carbono Total (g/kg) | 360 - 450 | 346 | 328 – 395 | n.a. | n.a. | n.a | n.a. | n.a. |
| Relação C/N | 3 - 8,5 | 1,3 – 29,8 | 2,63 | n.a. | 15,71 | 15,11 | 14,20 | n.a. |
| Fósforo Total (g/kg) | 6,0 – 17,0 | 2 - 9 | 9,3 | 0,25 | 4,21 | 4,23 | 10,79 | 0,095 |
| Potássio Total (g/kg) | 19,0 – 43,0 | 6 -10 | 23,3. | 1,5 | 11,49 | 8,22 | 7,25 | 0,544 |

| | | | | | | | | |
|-----------------------|-----------|------|------|-------|--------|--------|--------|-------|
| Magnésio Total (g/kg) | 3,0 – 7,0 | n.a. | n.a. | 0,045 | 3,24 | 4,29 | 3,47 | 0,115 |
| Enxofre (g/kg) | n.a. | n.a. | n.a. | 0,28 | 2,22 | 5 | 2,16 | n.a. |
| Sódio (g/kg) | n.a. | n.a. | n.a. | 0,8 | n.a. | n.a. | n.a. | 0,132 |
| Cálcio (g/kg) | n.a. | n.a. | n.a. | 0,7 | 37,05 | 29,72 | 42,31 | 0,160 |
| Ferro (mg/kg) | n.a. | n.a. | n.a. | 325 | 5790,0 | 5060,0 | 7890,0 | 2,72 |
| Zinco (mg/kg) | n.a. | n.a. | n.a. | 9,25 | n.a. | n.a. | n.a. | 0,30 |
| Manganês (mg/kg) | n.a. | n.a. | n.a. | 5,25 | n.a. | n.a. | n.a. | 1,09 |

*Considerando densidade igual a 1 g/mL.

n.a. - parâmetro não avaliado pelo autor

OFMSW – *Organic fraction of municipal solid waste*

FW – *Food Waste.*

FFMSW – *Fermentable fraction from municipal solid waste.*

BW – *Biowaste.*

3.6. Uso do digestato como fertilizantes

Os fertilizantes minerais e químicos são predominantes no mercado, porém os fertilizantes orgânicos possuem diversas vantagens a serem consideradas. Além da vantagem econômica, por serem em geral produtos de baixo custo, também auxiliam na mitigação dos impactos ambientais através da diminuição das emissões de gases de efeito estufa (GEE) relacionadas à produção de fertilizantes, economia de energia e a recirculação dos nutrientes (AKBAR et al., 2021). Segundo Sharma et al. (2023), o digestato é um subproduto de plantas de produção de biogás e pode contribuir como estratégia para o aumento da receita da planta.

Diversos autores têm pesquisado o uso do digestato para aplicação como fertilizantes na agricultura, de forma a reduzir ou mesmo, substituir o uso de fertilizantes minerais e sintéticos. Slepetiene et al (2020) avaliaram o potencial do uso de digestato sólido e líquido, como biofertilizante e corretivo do solo, em áreas inférteis e em solos erodidos. O estudo revelou que as propriedades das diferentes fases do digestato diferiram consideravelmente de acordo com os teores de sólidos totais, matéria orgânica e principalmente em carbono orgânico.

Ainda nesse sentido, Singh et al (2022), em um artigo sobre biofertilizantes a partir de digestato, concluíram haver alto contraste na composição dependendo do tipo de matéria-prima, o parâmetro da digestão anaeróbica e tratamentos e o impacto significativo na dinâmica dos nutrientes após sua aplicação no solo.

A legislação alemã sobre fertilizantes e adubos, *Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit* de 2017, impõem limites de nutrientes que podem ser aplicados por hectare de solo (HERBES et al., 2020). Adicionalmente, segundo Sigurnjak (2017), a Comissão Europeia impôs uma aplicação máxima de nitrogênio na forma de nitrato de 170 kg N/hectare.ano. A pasteurização do digestato, oriundo de resíduos de frigoríficos e resíduos de alimento é obrigatória na Europa devido a uma regulação, a *Animal By-Products Regulation* (EC) No.1069/2009 da *European Parliament and of the Council* (NORDELL et al., 2022).

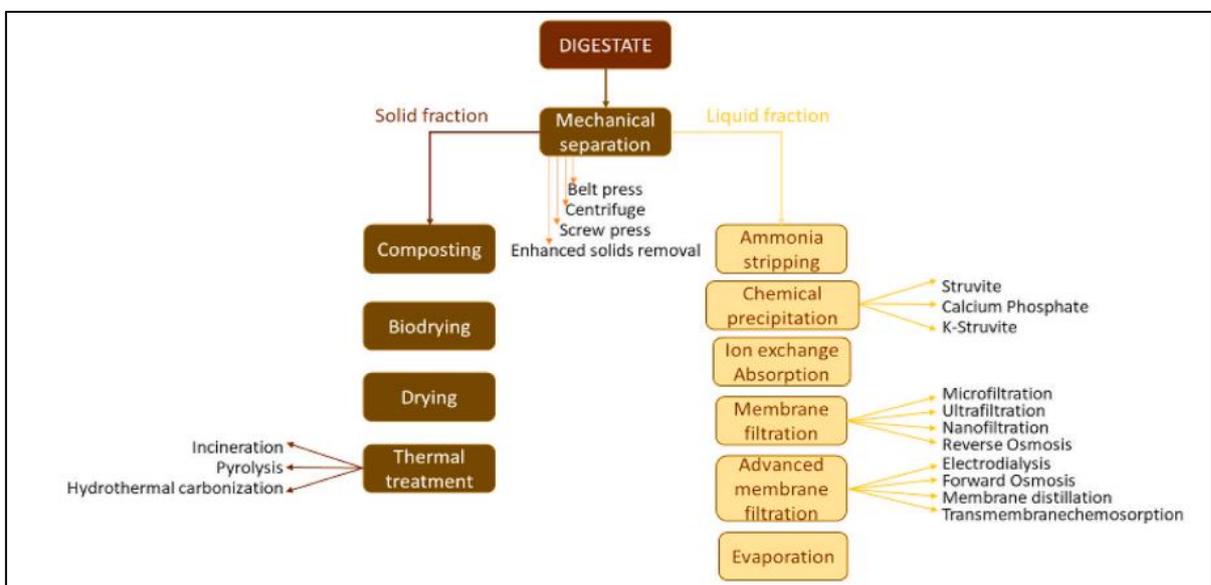
Segundo Kinyua et al. (2016), em um sistema de digestão anaeróbia de dejetos suínos foi possível reduzir 60% de *Cryptosporidium parvum* e 90% de *Giardia lamblia*. Dessa forma, torna-se necessário o controle dos dejetos animais, pois o solo pode ser contaminado e afetar a cultura.

Castro et al. (2017) afirmam que é importante avaliar a concentração de sódio, pois é um elemento que em alta concentração pode afetar a condutividade hidráulica do solo, reduzir a aeração e induzir a impermeabilização do solo. Ou seja, o digestato poderia causar a lixiviação do solo, por isso é importante caracterizar e avaliar o potencial do material antes de ser utilizado como biofertilizante. Além disso, a alta concentração de sódio também poderia elevar a concentração de sais solúveis no solo, causando salinidade, prejudicial a maioria das culturas (CASTRO et al., 2017; TANG et al., 2019; ZHANG et al., 2010).

Albuquerque (2012) diz que outro ponto relevante para se caracterizar o material é para conseguir mensurar o quanto será utilizado do biofertilizante e qual o risco de toxicidade para o ambiente, como acúmulo de metais contaminante, salinização, efeitos fito tóxicos.

Segundo Ehmann et al (2018), apesar do uso do digestato como fertilizante ser uma maneira eficiente de fechar os ciclos de nutrientes na agricultura e reduzir insumos externos de fertilizantes sintéticos, seu o alto teor de água limita a sua capacidade para transporte e armazenamento, sendo necessário tratamentos adicionais para separar as frações sólida e líquida. Barampouti (2020) também afirma a possibilidade de utilizar o digestato como uma peça que fecha o ciclo da produção de biogás, além de poder reaproveitar os nutrientes do digestato. Mas um dos desafios do digestato é a alta teor de líquido, que limita seu transporte, que encarece ao carregar um grande volume. Assim, Barampouti (2020) sugere pós-tratamentos ao digestato, apresentados na Figura 8, afim de reduzir seu volume.

Figura 8 – Tratamentos e aplicações do digestato.



Fonte: Barampouti (2020)

Na literatura, diversos trabalhos utilizaram o digestato como biofertilizante. Esses trabalhos utilizam o digestato bruto ou com algum pós-tratamento. A Tabela 7 apresenta um resumo desses trabalhos.

Tabela 8 - Trabalhos que utilizaram o digestato como biofertilizante.

| Autor | Digestato | Cultura Vegetal | Tratamento do digestato | Método de aplicação | Resultados |
|----------------|--|---|--|---|--|
| Machado (2022) | Resíduos sólidos orgânicos domésticos | Alface Crespa Vera | Digestato bruto e tratado com filtros anaeróbios verticais descendentes (SFAV). | NPK mineral recomendado; Biofertilizante + NP mineral; Biofertilizante + N mineral; Biofertilizante + P mineral; Biofertilizante | O digestato indicou baixo risco de sodicidade, porém um risco muito alto de salinização do solo, apontando a necessidade de um uso planejado e controlado. |
| Simon (2020) | Resíduo alimentar do restaurante universitário e de resíduo de jardinagem | (<i>Lactuca sativa</i>) | Concentração do digestato por secagem. Digestato Sólido obtido por centrifugação | Digestato sólido e líquido; fertilizante mineral; Combinações de fertilizante comercial e digestato. 6,25 mL. 5 tratamentos: 100%, 50%, 25%, 10% e 5% | O digestato líquido apresentou toxicidade por conter alta concentração de nitrogênio amoniacal, sais e alta condutividade elétrica. |
| Weimers (2022) | Resíduos Sólido doméstico, dejetos suínos e bovinos, resíduos de abatedouro, gordura de ganso e outros resíduos de alimentos | Pak choi (<i>Brassica rapa</i> , ssp. chinensis, "Joy Choi") | Trituração e filtração uma malha de 0,8 mm. Foi realizada a nitrificação por MBBR. | Digestato nitrificado (D1); digestato nitrificado +P, Mg, S, Mn, B e Mo (D2); Solução mineral equivalente ao digestato nitrificado (M1); Solução mineral comercial (M2); água (controle). | - Limitação de Fósforo com o digestato nitrificado, mas atende a concentrações de alguns cultivos; - D1 e M1 produziram a mesma massa seca. Porém a produção de massa fresca foi a mesma em D1 e M2; A performance de D2 foi a mesma que M2 em relação a produção de massa fresca; |

| | | | | | |
|-----------------------------------|--|---|---|--|--|
| Meng (2022) | Resíduo alimentar | Chinese Cabbage | Apenas diluição do digestato. | Concentrações do digestato: 0, 5, 10, 15, 20, 25%, 50 e 100% | O digestato diluído em 10% não apresentou danos agrônômicos ao solo, além de ter sido possível germinar as sementes. O uso de 50% e 100% apresentaram resultados positivos ao final da plantação, pois conseguiram suprir os nutrientes. |
| Koszel (2015) | Poda, restos de milho, polpa de beterraba, leite vinhaça | Alfafa | - | Aplicação do digestato (180 litros) e do fertilizante mineral (Nitrogênio – 20 kg/ha, Fósforo – 60 kg/ha, Potássio – 80 kg/ha.) em 50 m ² . | O uso do digestato demonstrou um plantio de alfafa com mais nutrientes em relação à alfafa plantada com fertilizante mineral. Além disso, foi possível verificar que o número de patógenos foi menor. |
| Valentinuzzi (2020) | Resíduos de fazendas | Milho (<i>Zea mays L</i>) e pepino (<i>Cucumis sativus L</i>) | Digestato obtido da Biogas Wipptal, que comercializa o produto na forma líquida e sólida (pellet) | Aplicação de 75 mg N/kg e 300 mg N/kg de digestato na forma de pellet, digestato líquido, dejetos bovino e ureia. | As duas formas do digestato atuaram como um fertilizante mineral. |
| Bergstrand, Asp e Hultberg (2020) | Resíduos de fazendas, dejetos, resíduos de frigoríficos e resíduos de alimentos. | Pak Choi (<i>Brassica campestris v. chinensis cv. Joi Choi</i>) | Nitrificação | 4 tratamentos: MIN – solução mineral a partir de fertilizantes comerciais; Digestato nitrificado com C.E. de 1, 2 e 4 mS/cm. | O digestato apresentou resultados positivos no uso como líquido fértil em sistema de hidroponia doo tipo NFT. |
| Barzee et al. (2019) | Dejeto bovino e resíduos alimentares | Tomate (<i>Lycopersicon esculentum Mill</i>) | Ultrafiltração em 53 µm | Digestato sólido e líquido de dejetos bovino e de resíduos alimentares obtidos pela ultrafiltração | O uso dos dois tipos de digestato mostraram resultados melhores ao fertilizante mineral. |

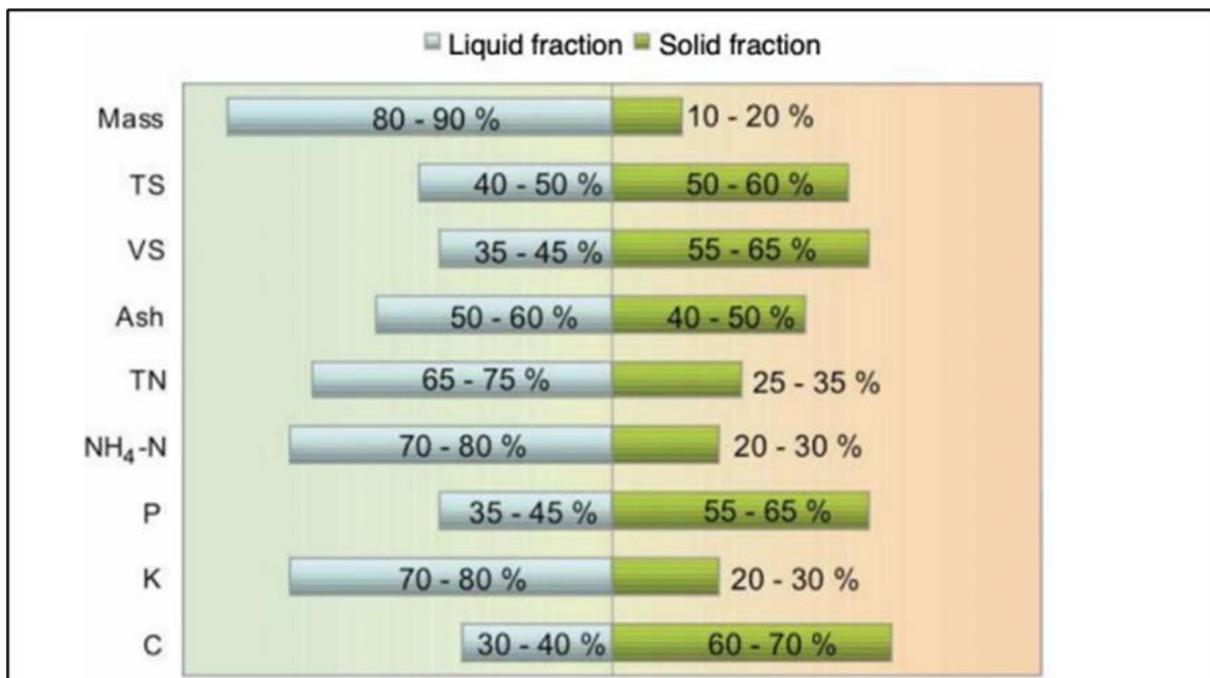
Como pôde ser visto na Tabela 7 acima, o digestato já foi testado em diversas culturas vegetais e os resultados foram positivos. O digestato pode ser utilizado diretamente no solo, na forma como é produzido, ou pode ser refinado através de uma série de tratamentos e tecnologias (AL SEADI et al., 2013). O método mais utilizado, devido à sua simplicidade e baixo custo, é a separação do digestato em frações líquidas e sólidas, utilizando centrífugas, decantadoras e separadores de prensas de parafuso (TAMBONE et al., 2017). Separar as frações do digestato produz fertilizante mais adequado para fins específicos do que para aplicações gerais (SONG et al., 2021)

3.7. Valorização do digestato

A proporção da fração líquida na massa total do digestato corresponde a cerca de 90-95%, qualidade que pode inviabilizar a aplicação e utilização do digestato, principalmente pelo aumento dos custos com transporte. A separação das fases é uma das formas de tratamento para valorização e comercialização do digestato.

Entretanto, a concentração de nutrientes após separação deve ser conhecida, já que alguns nutrientes podem estar mais concentrados nas diferentes fases. Alguns estudos demonstram que após a separação das fases, o amônio e o potássio estarão majoritariamente presentes na fase líquida, enquanto a fração sólida conterá a maior parte do fosfato e material orgânico (FIELD et al., 1984). Tambone et al., (2017) reportaram a caracterização e o balanço de massa de amostras de digestato de 30 diferentes plantas, os quais passaram por processo de separação física e que a fração líquida detém 67%, 87% e 71% do total da matéria Seca, do Nitrogênio total e do P_2O_5 , respectivamente. As caracterizações demonstraram também que do nitrogênio total, 60% estava presente na forma de amônio, sugerindo o potencial de utilização do digestato como fertilizante. A Figura 9 apresenta um balanço médio das frações de digestato.

Figura 8 - Distribuição dos principais constituintes do digestato após a separação das frações.



TS: Sólidos Totais; VS: Sólidos Voláteis; Ash: Sólidos fixos; TN: Nitrogênio Total; NH₄-N: amônio; P: Fósforo; K: Potássio; C: carbono. Fonte: *Nutrient Recovery by Biogas Digestate Processing* (DROSG et al., 2015).

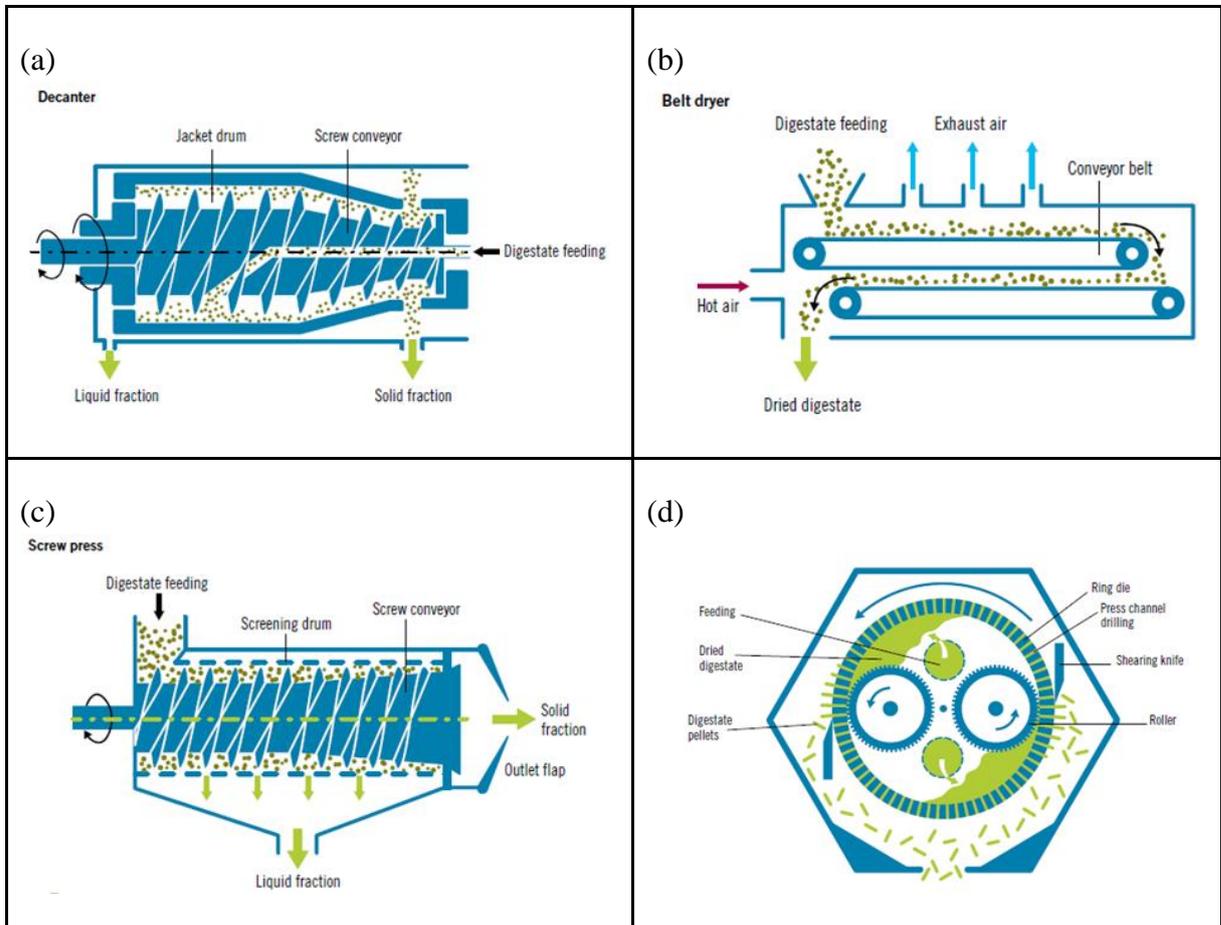
O nitrogênio amoniacal, resultante da degradação de proteínas presentes no substrato, pode ser encontrado sob as formas íon amônio (NH₄⁺) ou amônia (NH₃). O nitrogênio amoniacal total (N-NH₄⁺) é uma fonte essencial de nitrogênio para os micro-organismos envolvidos no processo anaeróbico e micro-organismos do solo. O nitrogênio orgânico ainda remanescente no digestato pode ser mineralizado e disponível para a vegetação (GIZ, 2018). Na fração líquida está em maior concentração do íon amônio, por isso é nutritiva, sendo fonte de nitrogênio (SIGURNJAK et al., 2017; TAMBONE et al., 2017; VALENTINUZZI et al., 2020). Além disso, na fração líquida há muitas substâncias orgânicas solúveis (LAMOLINARA et al., 2022).

Já o fósforo pode ser encontrado na forma de fosfatos, que tem sua forma química alterada pelos valores de pH (HPO₄²⁻ → PO₄³⁻). Durante o processo de digestão anaeróbia, a fração de P dissolvido é mineralizada e associa-se aos sólidos em suspensão (FIELD et al., 1984; MÖLLER; MÜLLER, 2012).

Algumas técnicas de separação das fases líquida e sólida do digestato já são utilizadas em plantas na Europa (GIZ, 2018), dentre elas a evaporação, desidratação, filtração por membranas, que podem ser seguidas por granulação ou peletização do material sólido. A

Figura 10 apresenta as técnicas de separação mais utilizadas. Essas medidas têm por objetivo otimizar a gestão do biofertilizante para redução dos custos de transporte e valorização do produto.

Figura 10 - Representação esquemática das técnicas de separação da fração líquida e sólida do digestato. (a) Decantador; (b) Secador; (c) Filtro prensa; (d) Peletização.



Fonte: Adaptado de *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ, 2018)*.

Dentre as opções, o decantador é um sistema onde um transportador de parafuso tem rotação mais rápida que o tambor de jaqueta. Devido a inércia e densidade, o material sólido é pressionado contra o tambor e separado da fração líquida, com consumo energético de 2 a 5 KW/m³. A tecnologia de filtro prensa o digestato é comprimido para separação, com consumo energético de 0,5 – 5 kWhel/m³ de entrada. Já a prensa parafuso (*screw press*) é uma das técnicas mais utilizadas, no qual a pressão de contato utilizada determina o grau de separação, por ser uma tecnologia robusta e simples com consumo energético de 0,2 a 0,6 kWkel/m³ (GIZ, 2018).

Outra tecnologia de secagem do digestato, é realizada por secadoras que trabalham com temperaturas de 60 a 150°C por duas horas, com resultado de concentração de sólidos totais

superior a 90%, facilitando o transporte e reduzindo os seus custos. A secagem do material pode resultar também em alguns problemas como altas produções de cinzas e emissão de NO_x e amônia.

O IMA de Santa Catarina menciona na IN 11 que os dejetos suínos podem ser separados por decantação, prensa parafuso e peneira com escova rotativa. Esses métodos estão presentes na Figura 10, demonstrando que já é uma realidade a separação e uso do digestato como biofertilizante no Estado de Santa Catarina.

Bolzonella et al (2018) realizou o estudo de separação do digestato de dejetos bovinos e dejetos suínos, verificando as concentrações de Nitrogênio e Fósforo em cada fase, detalhadas na Tabela 9. O digestato passou pelos processos de *screw press*, centrifugação, ultrafiltração e osmose reversa. Comparando os dois tipos de digestato trabalhados, é possível verificar que há maior concentração de fósforo no digestato de dejetos bovinos do que no dejetos suínos, e prevalecendo em maior proporção na fase sólida do que na fase líquida. Além também, a partir dos valores apresentados, pode-se verificar que o método por centrifugação foi o que conseguiu separar o digestado da melhor forma.

Tabela 9 - Concentrações de Nitrogênio e Fósforo do digestato de dejetos bovinos pós-tratado.

| Tratamento | Digestato de dejetos bovinos | | Digestato de dejetos suínos | |
|---------------------|------------------------------|----------------------|-----------------------------|----------------------|
| | Nitrogênio total (g/kg) | Fósforo Total (g/kg) | Nitrogênio total (g/kg) | Fósforo Total (g/kg) |
| Digestato bruto | 3,35 ± 0,3 | 1,64 ± 0,3 | 2,25 ± 0,4 | 0,36 ± 0,01 |
| Screw Press – FS | 3,25 ± 0,3 | 4 ± 0,9 | 4,62 ± 0,8 | 1,92 ± 0,01 |
| Screw Press – FL | 3,23 ± 0,2 | 1,29 ± 0,1 | 2,20 ± 0,3 | 0,25 ± 0,02 |
| Centrifugação – FS | 7,25 ± 1,0 | 5,25 ± 1,2 | 3,74 ± 0,3 | 1,54 ± 0,02 |
| Centrifugação – FL | 1,7 ± 0,1 | 0,13 ± 0,05 | 1,66 ± 0,2 | 0,15 ± 0,01 |
| Ultrafiltração – FS | 2,9 ± 0,2 | 0,25 ± 0,03 | 1,52 ± 0,5 | 0,19 ± 0,02 |
| Ultrafiltração - FL | 1,3 ± 0,1 | 0,092 ± 0,01 | 1,56 ± 0,3 | 0,08 ± 0,02 |

| | | | | |
|---------------------------|-----------|-------------|-------------|-------------|
| Osmose reversa - centrado | 4,8 ± 0,3 | 0,36 ± 0,03 | 5,27 ± 0,8 | 0,26 ± 0,01 |
| Osmose reversa “filtrado” | < 0,1 | <0,01 | 0,08 ± 0,05 | <0,01 |

FS: Fase sólida; FL: Fase líquida. Fonte: Adaptado de Bolzonella *et al* (2018).

O digestato pode também ser incorporado ao solo diretamente. Uma das desvantagens dessa aplicação é que, a incorporação em solos onde a cultura já está em crescimento não é aplicável. As concentrações de NH_3 podem ser consideradas como nitrogênio mineral disponível do biofertilizante, desde que aplicados de forma adequada, evitando volatilização. Atualmente, a redução dos impactos ambientais associados à aplicação do digestato pode ser efetivada por meio da acidificação do mesmo. Este procedimento visa controlar a volatilização da amônia (NH_3), um subproduto crítico, uma vez que a taxa de volatilização está intrinsecamente ligada ao pH do digestato. Em condições de pH mais baixo, a forma ionizada da amônia (NH_4^+) predomina. A utilização de pH reduzido resulta em uma maior proporção de NH_4^+ no digestato, minimizando o risco de perdas na forma volátil (NH_3) durante a aplicação no solo (GIZ, 2018)..

No contexto da aplicação direta de digestato líquido, diversas técnicas têm sido desenvolvidas para otimizar o processo. Entre essas técnicas, destacam-se os sistemas que empregam mangueiras de arrasto, distribuidores equipados com dragas e sistemas automatizados de injeção. Estas abordagens visam aprimorar a distribuição homogênea do digestato no solo, minimizando potenciais perdas e maximizando a eficiência agrônômica da aplicação. (GIZ, 2018).

A aplicação direta pode gerar um outro passivo relacionado à emissão de odor, devido a presença de ácidos orgânicos voláteis presentes no digestato. Os tratamentos mencionados podem auxiliar na redução do odor durante a aplicação devido à redução desses compostos. A caracterização e conhecimento do digestato e a demanda de nutrientes nas áreas de plantio, o tratamento e a logística de distribuição do digestato devem ser considerados já na fase de projeto a fim de se levantar os custos e limitações técnicas.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Nessa Seção 4, são apresentados os processos de coleta e separação das amostras do digestato da Usina de Bioenergia e Biofertilizantes, e metodologias de ensaio utilizadas.

4.1 Coleta e preparação das amostras

As amostras do digestato analisadas no trabalho foram coletadas do Tanque 2 da Usina de Bioenergia e Biofertilizantes em cinco períodos diferentes, sendo dentro dos 500 dias de operação, conforme apresentado na tabela 10. A Tabela apresenta também o tempo de operação do biodigestor no momento da coleta.

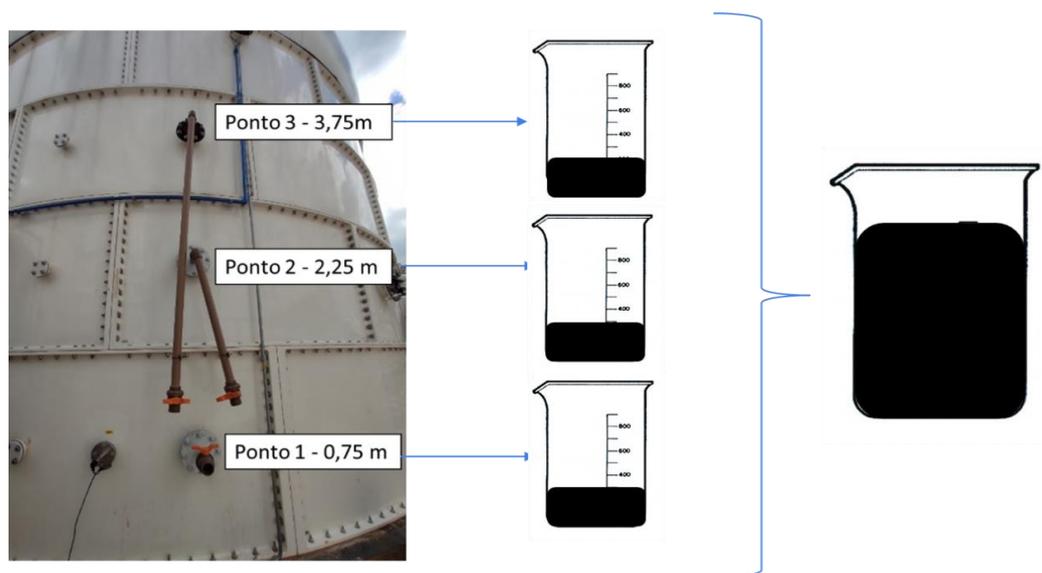
Tabela 10 - Períodos das coletas de amostra de digestato.

| Amostra | Mês de coleta | Tempo de operação (dias) |
|----------------|----------------------|---------------------------------|
| 1 | Julho/21 | 62 |
| 2 | Dezembro/21 | 215 |
| 3 | Abril/22 | 336 |
| 4 | Junho/22 | 397 |
| 5 | Agosto/22 | 458 |

Fonte: Autoria própria (2023).

A amostragem foi realizada em três diferentes alturas. Os pontos de amostragem estão localizados nas alturas de 0,75m; 2,25m e 3,75m, conforme apresentado na Figura 11. Foram coletados 5 litros de digestato em cada ponto. De cada amostra foram separados 500 ml para a composição da amostra final.

Figura 9 - Pontos de coleta no Tanque 2 do Biorreator da Usina Experimental de Biogás.



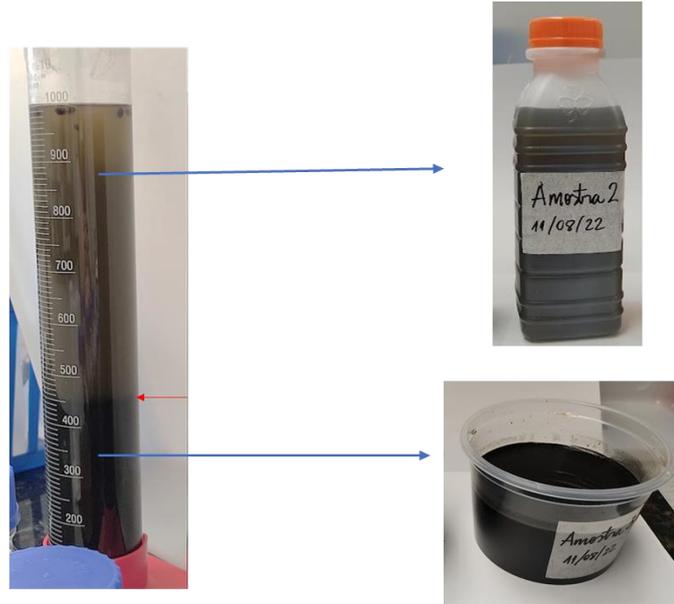
Fonte: Autoria própria (2021).

4.2. Balanço de massa

O balanço de massa foi feito apenas para a coleta 5. Essa amostra foi submetida a diferentes processos de separação, sendo o de decantação e de centrifugação.

Para a decantação, o material da amostra 5 foi adicionado em uma proveta de 1000 ml. Esperou-se por cerca de 48 horas até a sedimentação do material sólido no fundo da proveta. Após decorrido esse tempo, o material líquido foi retirado através de uma mangueira conectada a uma bomba peristáltica. Já o material sólido, foi coletado pela simples retirada do material da proveta. Na Figura 10, está presente uma foto da proveta com a divisão de fases do digestato. Dos 1000 mL da proveta, 550 eram a fração líquida e 450 eram a fração sólida ou a parte sedimentável.

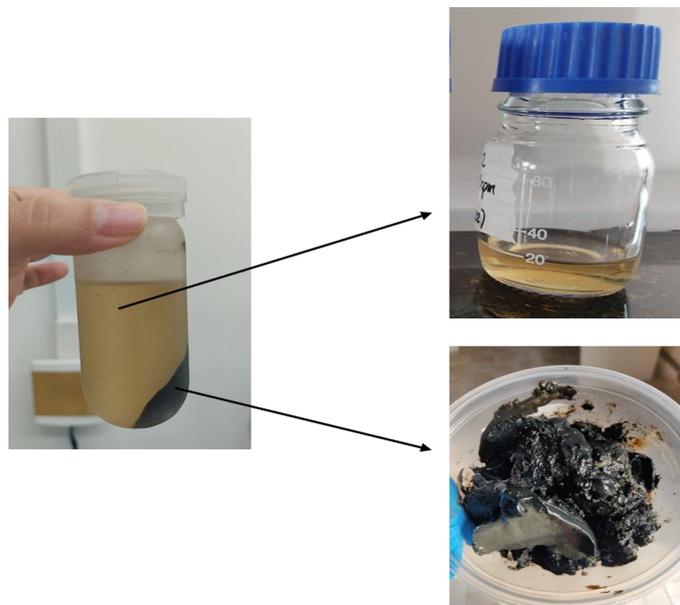
Figura 10 - Separação das fases do digestato por decantação após 48 horas em uma proveta de 1000 mL..



Fonte: Autoria própria (2022).

Para a centrifugação, foi utilizado o equipamento Centrífuga Hitachi CR2GIIa 5000rpm por 30 minutos. De 3396 gramas de digestato, 3052 gramas eram a fração líquida e 344 gramas a fração sólida. Na Figura 11, está apresentado o Tubo Falcon com a amostra bruta após passar pelo processo de centrifugação e suas frações resultantes

Figura 11- Separação das fases do digestato por centrifugação.



Fonte: Autoria própria (2022).

4.2 Ensaio e análises e suas metodologias

As análises foram realizadas no Laboratório de Fertilizantes e Corretivos e subprodutos do Departamento de Ciência do Solo, localizado na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba/SP (ESALQ, 2023), com exceção de nitrogênio amoniacal, que foi analisado pelo Laboratório de Saneamento e Hidráulica (Eng. Civil/EP-USP). Os parâmetros analisados e as suas respectivas metodologias estão apresentados na Tabelas 10.

Tabela 11 - Análises físico-químicas feitas nas amostras líquida e sólida e as metodologias correspondentes.

| Análise | Metodologia | Referência |
|--|--|-------------------------|
| pH | pHmetro | - |
| Densidade | Relação massa/volume | - |
| Condutividade Elétrica (C.E.) | Condutímetro | - |
| Nitrogênio (N) Total | Digestão sulfúrica/Kjeldahl | Embrapa, (2009) |
| Fósforo (P ₂ O ₅) Total | Digestão ácida e determinação por colorimetria | |
| Potássio (K ₂ O) Total | Digestão ácida e determinação por fotometria de chama | |
| Sódio (Na) Total | | |
| Enxofre (SO ₄) Total | Digestão ácida e determinação pelo método gravimétrico do sulfato de bário | |
| Cálcio (Ca) Total | | |
| Magnésio (Mg) Total | | Brasil(2017) |
| Cobre (Cu) Total | Digestão ácida e determinação por absorção atômica | |
| Ferro (Fe) total | | |
| Manganês (Mn) Total | | |
| Zinco (Zn) Total | | |
| Carbono Orgânico - via úmida | Extração com dicromato e determinação por titulometria | |
| Relação C/N | Obtida por meio de cálculo | - |
| NH ₄ | | APHA (método 4500 B/C) |
| Arsênio, Bário, Cádmio, Chumbo, Cobre, Cromo, Mercúrio, Molibdênio, Níquel e Selênio | Espectrofotometria de atômica | U.S. EPA SW – 846 3050b |

Fonte: Adaptado de ESALQ (2023).

As análises microbiológicas foram feitas nas amostras 1 e 4. Na amostra 1, utilizou-se da mesma amostra representativa de digestato e foi submetida para verificação de presença de *Escherichia coli* totais e *Escherichia coli* fecais ou coliformes termotolerantes feito pela empresa Andrios Assessoria, utilizando a metodologia COLItest®, que segue as recomendações da *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (AWWA; WEF; AFA, 2017). Na amostra 4, foi utilizado o método da U.S. EPA 1992 part 503(USEPA, 1992).

Para o cálculo de RAS, foi considerado que 1 mmol_c é igual a massa atômica / valência / 1000. Ou seja, foram considerados os seguintes valores:

$$1 \text{ mmol}_c \text{ Ca} = \frac{\frac{40}{2}}{1000} = 0,02 \text{ gramas}$$

$$1 \text{ mmol}_c \text{ Mg} = \frac{\frac{24}{3}}{1000} = 0,009 \text{ gramas}$$

$$1 \text{ mmol}_c \text{ Na} = \frac{\frac{23}{1}}{1000} = 0,023 \text{ gramas}$$

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, são apresentados e discutido os resultados obtidos pelas análises físico-químicas e microbiológicas das 5 amostras de digestato bruto coletadas durante os primeiros 500 dias de operação da Usina de Bioenergia e Biofertilizantes com resíduos orgânicos. Os resultados das análises físico-químicas se encontram na Tabela 12.

Tabela 12 - Resultados das 5 análises físico-químicas do digestato bruto.

| Parâmetro | Unidade | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Média | Desvio Padrão |
|--|-------------------------------|---------|-----------|-----------|---------|-------------|-------|---------------|
| pH | - | 7,1 | 7,5 | 7,7 | 7,7 | 7,9 | 7,58 | 0,30 |
| Sólidos totais | g/kg | 10,9 | 17,91 | 20,52 | 24,09 | 17,53 | 18,19 | 5,58 |
| Sólidos Voláteis | g/kg | 3,51 | 7,38 | 6,94 | 6,97 | 7,63 | 6,49 | 1,80 |
| SV/ST | - | 32% | 41% | 34% | 29% | 44% | 0,36 | 0,05 |
| Carbono orgânico | % | 0,42 | 0,12 | 0,24 | 3,43 | 0,97 | 1,036 | 1,37 |
| Nitrogênio (N) Total | g/kg | 1,06 | 1,96 | 2,34 | 2,48 | 2,11 | 1,99 | 0,64 |
| Relação C/N | - | 3,82 | 3,0 | 3 | 14 | 5 | 5,76 | 4,67 |
| Fósforo (P ₂ O ₅) Total | g/kg | 0,45 | 0,69 | 0,67 | 0,88 | 0,63 | 0,66 | 0,18 |
| Potássio (K ₂ O) Total | g/kg | 0,16 | 1,65 | 1,6 | 1,8 | 1,8 | 1,40 | 0,77 |
| NPK | - | 6,6:3:1 | 2,8:1:2,4 | 3,5:1:2,4 | 2,8:1:2 | 3,34:1:2,85 | - | - |
| Sódio (Na) Total | g/kg | 0,175 | 0,4 | 1,75 | 1,9 | 2,25 | 1,295 | 0,94 |
| Cálcio (Ca) Total | g/kg | 0,46 | 0,36 | 0,35 | 0,52 | 0,4 | 0,40 | 0,10 |
| Magnésio (Mg) Total | g/kg | 0,11 | 0,10 | 0,11 | 0,14 | 0,11 | 0,10 | 0,0 |
| Enxofre (SO ₄) Total | g/kg | 0,21 | 0,31 | 0,12 | 0,14 | 0,14 | 0,2 | 0,1 |
| Cobre (Cu) Total | mg/kg | 1,75 | 1,5 | 1,75 | 3 | 3,5 | 2,3 | 0,9 |
| Ferro (Fe) total | mg/kg | 258 | 250 | 295 | 405 | 215 | 284,6 | 73,1 |
| Manganês (Mn) Total | mg/kg | 2,75 | 3 | 3,25 | 5 | 3,25 | 3,5 | 0,9 |
| Zinco (Zn) Total | mg/kg | 10 | 10,25 | 12,25 | 15,75 | 11 | 11,9 | 2,3 |
| RAS | (mmol/L)) ^{-1/2} | 1,66 | 4,25 | 18,73 | 16,81 | 22,68 | 12,82 | 9 |

Fonte: Autoria própria (2022).

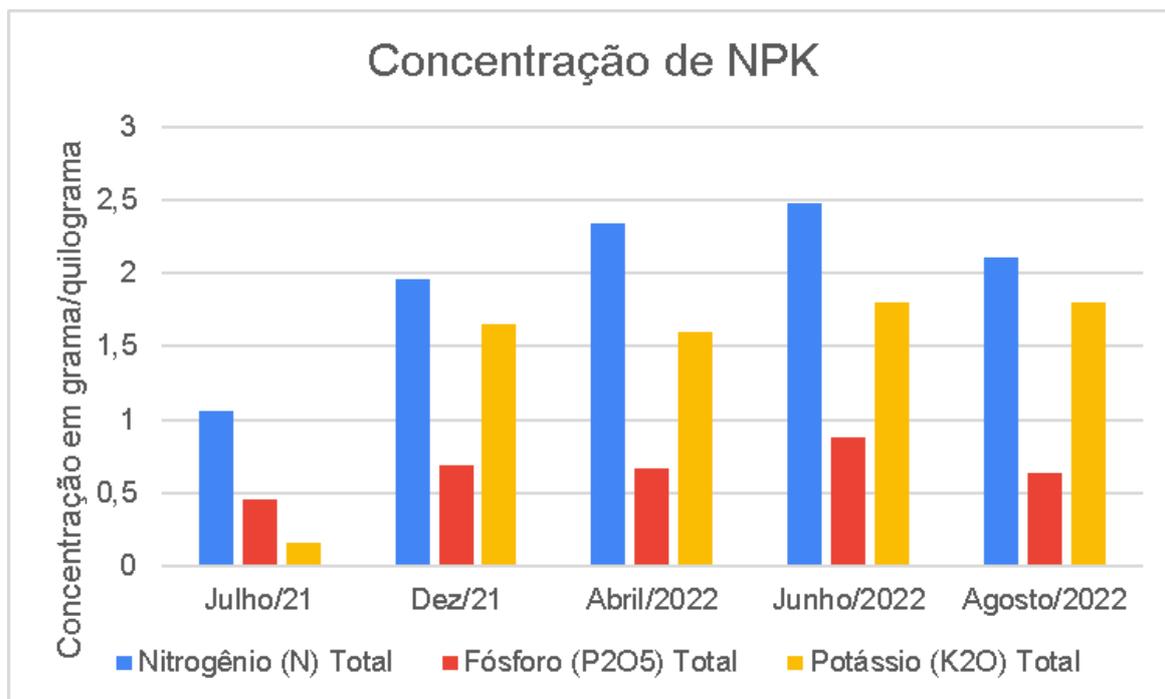
Ao longo do período analisado, percebe-se que o teor de pH teve um ligeiro aumento. Os sólidos totais e sólidos voláteis tiveram aumento progressivo entre as amostras analisadas desde o início da operação, com exceção da amostra 5, que apontou valores menores de ST em comparação a amostra 4. Isso pode ser explicado por mudanças na operação da Usina a partir de abril de 2022, que passou a realizar a alimentação diária no biorreator 1 ao invés do biorreator 2. Dessa maneira, o biorreator 2 passou a ser considerado um tanque de armazenamento e estabilização de digestato, não ocorrendo mais entrada de material fresco. Assim o valor de ST que seguia uma tendência de aumento, abaixou na 5ª amostra. O valor de Carbono Orgânico também apresentou uma diferença significativa devido à falta de contato com resíduos orgânicos diariamente.

Os valores de Cálcio e Magnésio da 5ª amostra tiveram uma leve queda em relação aos valores da 4ª amostra. E mesmo havendo essa redução de concentração desses dois elementos, o RAS permaneceu alto, pois o valor de Sódio aumentou. O valor de RAS permaneceu elevado em todas as amostras, pois está com uma concentração alta de sódio, que é encontrado no sal de cozinha, muito frequente nos restaurantes.

Com relação à queda das concentrações de Ferro, Manganês e Zinco da 5ª amostra em relação às outras amostras, pode-se dizer que houve sedimentação desses elementos. Mas são necessários mais estudos com esse enfoque.

A partir dos dados da Tabela 12, é possível verificar que o Nitrogênio esteve em maior concentração em comparação com o Potássio e o Fósforo. Como foi encontrado em Castro et al. (2017), o Fósforo está mais concentrado na fração sólida do digestato, por isso sua concentração foi a menor em todas as análises. É possível verificar que entre os três elementos o fósforo foi o que esteve em menor concentração.

Figura 12- Representação gráfica dos valores de NPK do digestato (período de julho de 2021 até agosto de 2022).



Fonte: Autoria própria (2023).

A tabela 13 apresenta a comparação dos resultados obtidos com a literatura. Os valores de Carbono total e Enxofre total do digestato da Usina de Biogás não atingiram os valores mínimos da literatura. Já os valores de Sódio total, Zinco total e RAS ultrapassaram a faixa de teores sugeridos pela literatura. De modo geral, não houve valores que estiveram muito distante faixa de valores da literatura, com exceção do sódio. É importante ressaltar que o valor de sódio também ultrapassou o limite estabelecido pela CETESB.

Tabela 13 - Comparação da média dos resultados do digestato com os valores encontrados em literatura.

| Parâmetros | Média dos resultados | Faixa dos dados da literatura |
|---|----------------------|-------------------------------|
| pH | 7,58 | 7,22 – 8,30 |
| Sólidos totais (%) | 1,819 | 0,49 – 53,3 |
| Sólidos Voláteis (%) | 0,649 | 0,28 – 79 % |
| Carbono Total (%) | 1,036 | 32 – 45 |
| Nitrogênio (N) Total (g/kg) | 1,99 | 0,349 - 30,89 |
| Relação C/N | 5,76 | 1,3 – 29,8 |
| Fósforo (P ₂ O ₅) Total (g/kg) | 0,66 | 0,095 – 10,79 |
| Potássio (K ₂ O) Total (g/kg) | 1,40 | 0,544 – 43 |
| Sódio (Na) Total (g/kg) | 1,295 | 0,132 – 0,8 |
| Cálcio (Ca) Total (g/kg) | 0,40 | 0,160 – 42,31 |
| Magnésio (Mg) Total (g/kg) | 0,10 | 0,045 – 7,0 |
| Enxofre (S) Total (g/kg) | 0,2 | 0,28 - 5 |
| Ferro (Fe) total (mg/kg) | 284,6 | 2,72 - 7890 |
| Manganês (Mn) Total (mg/kg) | 3,5 | 1,09 – 5,25 |
| Zinco (Zn) Total (mg/kg) | 11,9 | 0,30 – 9,25 |
| RAS | 102,1 | 1,95* |

*Somente o trabalho de Machado (2021) menciona sobre o RAS.

5.1 Balanço de massa

Os resultados obtidos para a amostra 5 bruta e para as frações sólidas e líquidas que passaram pelo processo de Decantação e Centrifugação são apresentados na Tabela 12. O digestato apresentou em sua composição 90% de massa líquida nas duas separações realizadas, corroborando com os dados da IEA (DROSG et al., 2015).

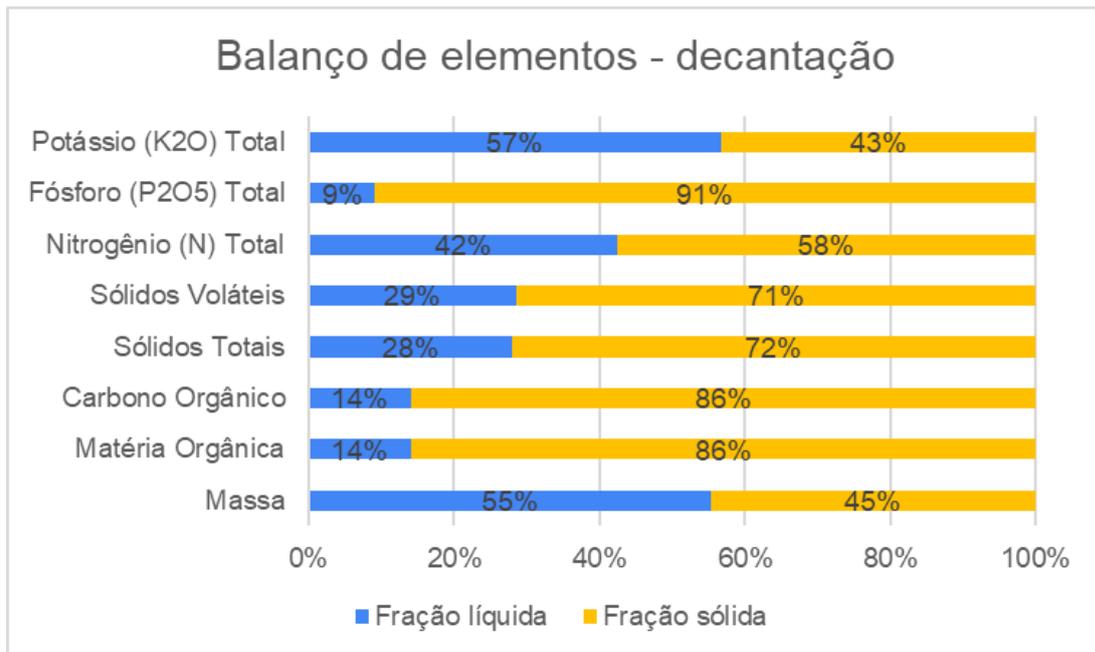
Tabela 14 - Concentrações de nutrientes no digestato bruto e nas porções separadas por decantação e centrifugação.

| AMOSTRAS DIGESTATO | | | | | | |
|--|---------|------------|-------------|-----------|---------------|-----------|
| PARÂMETROS | UNIDADE | Decantação | | | Centrifugação | |
| | | Bruto | Líquido | Sólido | Líquido | Sólido |
| pH | | 7,9 | 8,2 | 9 | 8,1 | 8,3 |
| Sólidos totais (ST) | g/L | 17,4 | 3,4 | 8,8 | 18 | 0,6 |
| Sólidos voláteis (SV) | g/L | 7,6 | 2,2 | 5,6 | 2,2 | 0,4 |
| SV/ST | % | 43,7 | 64,7 | 63,6 | 12,2 | 66,6 |
| Carbono orgânico Total | % | 0,97 | 0,09 | 1,8 | 0,12 | 35,38 |
| Nitrogênio Total | g/L | 2,11 | 1,44 | 2,41 | 1,5 | 7,4 |
| N-NH ₄ | mg/L | 1232 | 1148 | - | 1064 | - |
| Relação C/N | | 5 | 1 | 8 | 1 | 74,7 |
| Fósforo (P ₂ O ₅) Total | g/L | 0,63 | 0,07 | 0,87 | 0,04 | 7,2 |
| Potássio (K ₂ O) Total | g/L | 1,8 | 1,7 | 1,6 | 1,8 | 2,3 |
| N:P:K | | 3,35:1:2,8 | 20,6:1:24,3 | 2,8:1:1,8 | 37,5:1:45 | 3,2:3,1:1 |
| Sódio (Na) Total | g/L | 2,25 | 2,25 | 0,3 | 2,35 | 0,00036 |
| Cálcio (Ca) Total | g/L | 0,4 | 0,16 | 0,49 | 0,18 | 2,9 |
| Magnésio (Mg) Total | g/L | 0,11 | 0,05 | 0,13 | 0,05 | 0,7 |
| Enxofre (SO ₄) Total | g/L | 0,14 | 0,25 | 0,28 | 0,08 | 1,1 |
| Cobre (Cu) Total | mg/L | 3,5 | 3 | 3,75 | 1,5 | 0,02 |
| Ferro (Fe) total | mg/L | 215 | 7,25 | 430 | 4,25 | 2,21 |
| Manganês (Mn) Total | mg/L | 3,25 | 0,25 | 7,5 | 0,25 | 0,04 |
| Zinco (Zn) Total | mg/L | 11 | 0,25 | 14,25 | 0,25 | 0,12 |

Fonte: Autoria própria (2023).

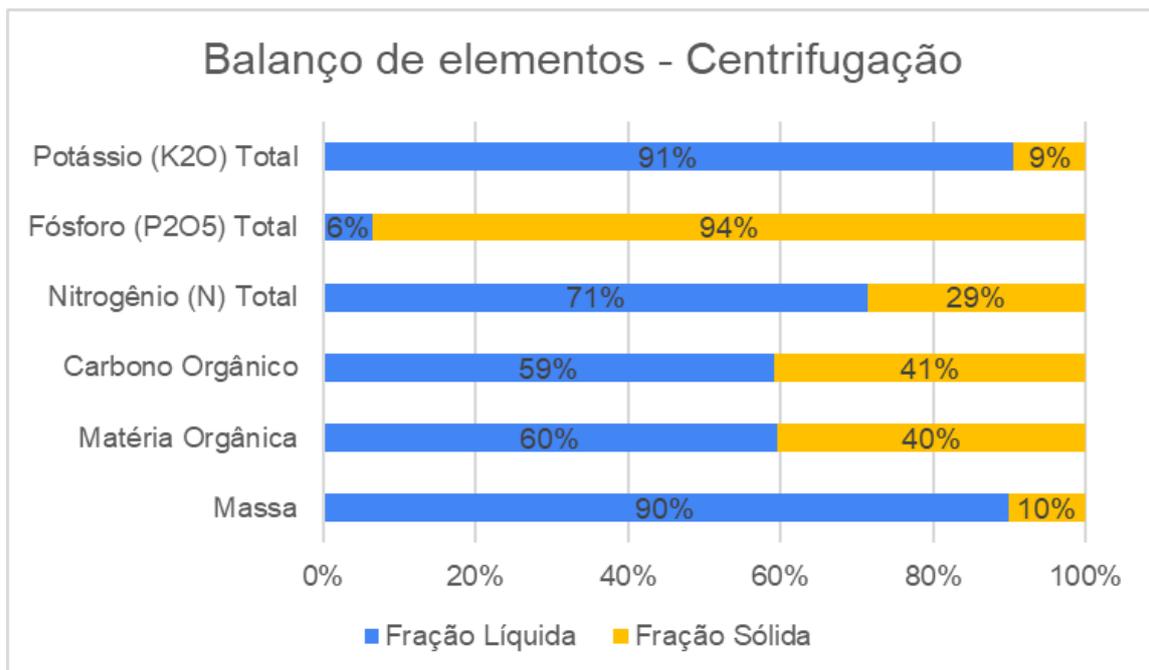
A partir dos resultados do balanço de massa, foi possível verificar que prevaleceram na fração sólida: Carbono orgânico, fósforo e ferro. Esses dados corroboram com os resultados obtidos por Singh et al. (2022) e Tuszynska et al. (2021). O pH é menor quando está na fase sólida, o mesmo dado encontrado por Singh et al. (2022). Tanto na decantação quanto na centrifugação, prevaleceram a fase líquida do digestato, mas no método da centrifugação foi possível encontrar uma separação melhor dos materiais suspensos, como pode ser visto na Figura 11. A fração líquida ficou menos turva e a fração sólida ficou mais compactada ao fundo do tubo. O balanço de massa dos dois processos de separação realizados para a amostra 5, decantação e centrifugação, são apresentados nas figuras 15 e 16, respectivamente.

Figura 13– Balanço de massa do digestato no processo de separação na decantação.



Fonte: Autoria própria (2023).

Figura 14- Balanço de massa do digestato no processo de separação por centrifugação.



Fonte: Autoria própria (2023).

5.2 Metais pesados

Na Tabela 13 a seguir, são apresentados os valores de metais pesados nas 5 amostras de digestato. Não foram encontradas variações discrepantes nos valores dos elementos, mesmo não havendo retirada de digestato na Usina. Além disso, não houve acúmulo desses elementos, verificando que não ultrapassaram os valores limites da resolução CONAMA (2006).

Tabela 15 - Resultados da análise dos metais pesados das 5 amostras de digestato bruto.

| Elementos | 1 ^a | 2 ^a | 3 ^a | 4 ^a | 5 ^a | Média | Desvio Padrão |
|------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------|---------------|
| Arsênio | <2,00 | <2,00 | <0,01 | 0,01 | <0,01 | 0,01 | 0 |
| Bário | 6,76 | <4,00 | 3,5 | 3,76 | - | 4,67 | 1,47 |
| Cádmio | <2,00 | <2,00 | 0,07 | 0,07 | 0,05 | 0,06 | 0,009 |
| Chumbo | <2,00 | <2,00 | 0,38 | 0,39 | 0,21 | 0,326 | 0,08 |
| Cobre | <4,00 | <4,00 | - | - | - | <4,00 | 0 |
| Cromo | 4,3 | <2,00 | 0,08 | 0,09 | 0,88 | 1,33 | 1,74 |
| Mercúrio | <2,00 | <2,00 | 1,47 | 1,61 | <0,01 | 1,54 | 0,07 |
| Molibdênio | <2,00 | <2,00 | <0,01 | <0,01 | - | 0,8 | 1,15 |
| Níquel | 2,02 | <0,40 | 0,09 | 0,11 | 0,33 | 0,63 | 0,8 |
| Selênio | <4 | <4,00 | 0,32 | 0,24 | 0,01 | 0,19 | 0,13 |

Fonte: Autoria própria (2023).

5.3 Análise microbiológica

O resultado das análises biológicas realizadas no Ensaio 1 e Ensaio 4 estão apresentados na Tabela 14. Não foram encontrados coliformes fecais, *salmonella* e ovos viáveis de helmintos. Assim, é possível afirmar que o digestato pode ser utilizado como biofertilizante, não contaminando a cultura do solo.

Tabela 16 - Resultado da análise biológica feita no digestato em junho/22.

| Parâmetro | Unidade | Amostra 1 | Amostra 4 |
|----------------------------|----------------|------------------|------------------|
| Coliformes Termotolerantes | +/- | Presente | Ausente |
| Coliformes fecais | +/- | Ausente | - |
| <i>Salmonella sp</i> | NMP/10 g | - | Ausente |
| Ovos viáveis de helmintos | Ovos/ g de ST | - | 0 |

Fonte: Autoria própria (2023).

6. DISCUSSÕES

De forma geral, o digestato apresentou pontos positivos para sua utilização como biofertilizante, com ausência de patógenos e não extrapolando limites de metais pesados. O digestato apresentou em sua maior concentração o NPK, elementos essenciais para nutrição do solo e fortalecimento de vegetais. Os valores de NPK podem não atingir os valores mínimos estipulados pelo MAPA (BRASIL, 2020b), mas deve-se reforçar que esses dados são apenas para comercialização do produto. Outro elemento em maior concentração foi o sódio, que é o elemento responsável pela sodicidade.

O digestato sendo aplicado como biofertilizante consegue fechar o ciclo de nutrientes. É importante ressaltar que sem esse tratamento de resíduos orgânicos, há um grande desperdício de nutrientes, como acontece nos aterros sanitários, onde não há a recuperação dos nutrientes. Atualmente não são encontradas no Brasil plantas de produção de biofertilizantes e bioenergia a partir de resíduos orgânicos em escala industrial, o que evidencia a falta de incentivos do governo para a implementação desse tipo de pacote tecnológico de serviços energéticos e ambientais.

No Brasil, com a implementação do Plano Nacional de Fertilizantes do MAPA em 2022 (BRASIL, 2021, 2022b, 2022a), espera-se que haja incentivos para produção de biofertilizantes a partir do digestato. É um meio de produção de fertilizantes sem a dependência do mercado exterior, ou seja, não há dependência de insumos para fabricação de fertilizantes minerais. O volume de digestato produzido nas usinas não irá suprir toda a demanda nacional de

fertilizantes, mas poderá contribuir com uma parcela dessa demanda, principalmente com os produtores localizados próximos à produção.

É importante mencionar também que o uso do digestato depende de análises físico-químicas para monitorar o seu conteúdo. Mais especificamente, o valor de sódio deve ser acompanhado para que não altere as características do solo, pois como foi visto no trabalho de Castro et al. (2017), Tang et al. (2019) e Zhang et al. (2010), em alguns casos o uso do digestato causou salinização e sodificação do solo. Assim, torna-se relevante acompanhar a concentração de sódio do digestato. Apesar de ter ultrapassado o valor estabelecido pela CETESB, o digestato ainda pode ser utilizado de forma que não se perca os seus nutrientes.

Em razão dessa alta concentração, foram feitas separadamente mais duas análises de Cálcio, Magnésio e Sódio do digestato. Foram feitas somente nas amostras 2 e 5, pois houve um imprevisto no freezer do Laboratório de Desenvolvimento de Energia, o que causou perda das outras amostras. A nova análise foi feita no Laboratório de Solos e Água do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal do Ceará, seguindo a mesma metodologia, fotometria de chama. Os novos resultados estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Concentrações de cálcio, magnésio e sódio das amostras 2 e 5.

| Amostra | Ca | Mg | Na | RAS |
|----------------|---------------|-----------|-----------|------------|
| | (mg/L) | | | |
| 2 | 201 | 202 | 330 | 3,93 |
| 5 | 43 | 36 | 346 | 9,27 |

Fonte: Autoria própria (2023).

Foi encontrada uma discrepância dos resultados apresentados pelo Laboratório de Fertilizantes, Corretivos e subprodutos, pois na nova análise foi encontrada uma concentração de menor de sódio. Isso tornou o digestato mais apropriado mais uso no solo, eliminando a hipótese de que poderia causar sodicidade. Além disso, no novo cálculo do RAS, o digestato encontra-se adequado de acordo com a regulamentação da CETESB.

Com relação aos processos de separação do digestato, o que apresentou melhor resultado foi a centrifugação a 10.000 rpm. Porém, tratando-se de uma quantidade em larga

escala, a centrífuga tem uma desvantagem que é o alto consumo de energia, o que poderia ser solucionado utilizando como fonte de energia o biogás da Usina.

Como pode ser observado, houve variação da composição do digestato durante os 500 dias de operação da Usina de Bioenergia. Então, assim como um fertilizante mineral, o digestato também deve ser avaliado, através das análises de solos para identificar as necessidades nutricionais e definir a forma de aplicação. O digestato possui uma valoração no mercado de fertilizantes e é importante que isso seja explorado e discutido no Plano Nacional de Fertilizantes. Como foi visto anteriormente, para se obter o potássio para produção de fertilizantes, são necessários recursos naturais. Dessa forma, é possível considerar o papel do digestato como fonte de potássio sem o uso de recursos naturais.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A partir dos resultados apresentados e da discussão anterior, foi possível concluir os seguintes pontos:

- O digestato da Usina de Bioenergia e Biofertilizantes com Resíduos Orgânicos apresentou uma composição similar com a literatura, mesmo que tenha uma composição variada.
- Os valores recuperados de NPK são consideráveis, o que torna o material relevante.
- Através da caracterização do digestato produzido a partir dos resíduos orgânicos de restaurantes, conclui-se que o material tem potencial para ser utilizado como biofertilizante diretamente no solo. Na média dos resultados, o macronutriente que esteve em menor concentração foi o fósforo, elemento escasso no solo brasileiro.
- O digestato produzida na Usina de Bioenergia e Biofertilizantes é constituído majoritariamente por água, o que pode dificultar o seu uso em locais distantes, sendo mais viável o seu uso nas áreas próximas da usina.
- Como maneira de valorizar o digestato e reduzir custos com transporte, pode-se fazer a separação das fases líquida e sólida. Os processos de separação feitos nesse trabalho apresentaram balanço de massa diferentes, sendo o melhor método o da centrifugação.
- Com o uso do digestato como biofertilizante, é possível devolver os nutrientes ao solo, demonstrando assim que a Usina de Bioenergia e Biofertilizantes é um pacote tecnológico de serviços ambientais e energéticos.
- Apesar da concentração de sódio ter crescido conforme foram feitas as análises, pode-se verificar em uma nova análise de cálcio, magnésio e sódio que o digestato não ultrapassou o limite de RAS estabelecido pela CETESB. Sendo assim, torna-se o digestato apropriado para uso agrícola.

8. SUGESTÃO DE TRABALHO FUTURO

Considerando-se o alto teor de água contido no digestato, uma hipótese levantada é a sua aplicação como líquido fértil em sistemas de hidroponia como no trabalho realizado por Bergstrand, Asp e Hultberg (2020). Para que isso seja possível, o digestato deve passar pelo processo de nitrificação, o qual reduzirá o amônio em nitrato, a forma química que é absorvida pelas plantas em sistema de hidroponia. Mas deve-se atentar às concentrações de Fósforo, pois como foi visto no trabalho de Weimers et al. (2022), há essa limitação no líquido fértil.

REFERÊNCIAS

AKBAR, S. et al. Anaerobic Digestate: A Sustainable Source of Bio-fertilizer. Em: **Sustainable Intensification for Agroecosystem Services and Management**. Singapore: Springer Singapore, 2021. p. 493–542.

AL SEADI, T. et al. Biogas digestate quality and utilization. Em: ELSEVIER (Ed.). **Biogas Handbook**. Esbjerg: University of Southern Denmark Esbjerg, Niels Bohrs, Vej 9-10, DK-6700 Esbjerg, Denmark, 2013. v. 1p. 1–126.

ALBURQUERQUE, J. A. et al. Assessment of the fertiliser potential of digestates from farm and agroindustrial residues. **Biomass and Bioenergy**, v. 40, p. 181–189, maio 2012.

ANDA. **Anuário estatístico do setor de fertilizantes 2022**. Associação Nacional para Difusão de Adubos. São Paulo., 2022.

AWWA; WEF; AFA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 23rd. ed. Washington, DC: : American Water Works Association (AWWA) American Public Health Association (APHA) Water Environment Federation (WEF), 2017.

BARAMPOUTI, E. M. et al. Exploring technological alternatives of nutrient recovery from digestate as a secondary resource. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 134, p. 110379, dez. 2020.

BARATI, M. R. et al. Comprehensive exergy analysis of a gas engine-equipped anaerobic digestion plant producing electricity and biofertilizer from organic fraction of municipal solid waste. **Energy Conversion and Management**, v. 151, p. 753–763, nov. 2017.

BARZEE, T. J. et al. Digestate Biofertilizers Support Similar or Higher Tomato Yields and Quality Than Mineral Fertilizer in a Subsurface Drip Fertigation System. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 3, 25 jul. 2019.

BENITES, V. DE M.; POLIDORO, J. C.; RESENDE, A. V. Oportunidades para a inovação tecnológica no setor de fertilizes no Brasil. **Rio de Janeiro: SBCS.**, 2010.

BERGSTRAND, K.-J.; ASP, H.; HULTBERG, M. Utilizing Anaerobic Digestates as Nutrient Solutions in Hydroponic Production Systems. **Sustainability**, v. 12, n. 23, p. 10076, 2 dez. 2020.

BOLZONELLA, D. et al. Nutrients recovery from anaerobic digestate of agro-waste: Techno-economic assessment of full scale applications. **Journal of Environmental Management**, v. 216, p. 111–119, jun. 2018.

BONFIM, C. A. **Biofertilizante Hortbio®: Características Microbiológicas e Efeito na Qualidade da Alfaca**. Dissertação (Mestrado)—Brasília: Instituto de Ciências Biológicas da Universidade de Brasília, 2016.

BRASIL. **Lei nº 6.894 de 16 de dezembro de 1980.** Presidência da República. Ministério da Agricultura - MAA. Dispõe sobre a inspeção e a fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, estimulantes ou biofertilizantes, remineralizadores e substratos para plantas, destinados à agricultura, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, , , 17 dez. 1980. Disponível em: <<https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=LEI&numero=6894&ano=1980&ato=b74cXVU9UMrRVT3be>>. Acesso em: 8 out. 2023

BRASIL. **Decreto nº 86.955, de 18 de fevereiro de 1982.** Regulamenta a Lei n. 6894, de 16 de dezembro de 1980, alterada pela Lei n. 6934, de 13 de julho de 1981, que dispõe sobre a inspeção e a fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, estimulantes ou biofertilizantes destinados à agricultura, e pelo Decreto-Lei n. 1899, de 1981, que institui taxas relativas às atividades do Ministério da Agricultura. Diário Oficial da União, Seção 1, 24/2/1982, p.3241. , , 18 fev. 1982. Disponível em: <<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1980-1987/decreto-86955-18-fevereiro-1982-436919-publicacaooriginal-1-pe.html#:~:text=Regulamenta%20a%20Lei%20n.,e%20pelo%20Decreto%2DLei%20n.>>. Acesso em: 10 out. 2023

BRASIL. **Decreto nº 4.954 de 14 de janeiro de 2004.** Aprova o Regulamento da Lei nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980, que dispõe sobre a inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes ou biofertilizantes destinados à agricultura, e dá outras providências. Presidência da República. Diário Oficial da União, Brasília, DF, Seção 1, p. 2, , 14 jan. 2004. Disponível em: <<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/2004/decreto-4954-14-janeiro-2004-497758-norma-pe.html>>. Acesso em: 7 out. 2023

BRASIL. **Resolução nº 237 do 17 de março de 2005.** Conselho Nacional do Meio Ambiente. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Diário Oficial da União nº 053. p. 58-63. , , 17 mar. 2005. Disponível em: <http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=450>. Acesso em: 10 out. 2023

BRASIL. **Instrução Normativa SDA nº 27, de 05 de junho de 2006 (Alterada pela IN SDA nº 7, de 12/04/2016, republicada em 02/05/2016).** , 2006a. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/in-sda-27-de-05-06-2006-alterada-pela-in-sda-07-de-12-4-16-republicada-em-2-5-16.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2023

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 375 de 29 de agosto de 2006. Gestão de Resíduos e Produtos Perigosos.** Ministro do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. Diário Oficial da União nº 167, Brasília, DF, Seção 1, p. 141-146, , 2006b. Disponível em:

<http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=497>.
Acesso em: 8 out. 2023

BRASIL. **Lei 12.890 de 10 de dezembro de 2013**. Altera a lei nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980, para incluir os remineralizadores como uma categoria de insumo destinado à agricultura, e dá outras providências. Diário Oficial da União de 11/12/2013, p.1, , 10 dez. 2013.

BRASIL. **Decreto nº 8.384 de 29 de dezembro de 2014**. . Diário Oficial da União, Seção 1, p. 24. , , 2014. Disponível em: <<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/2014/decreto-8384-29-dezembro-2014-779846-norma-pe.html>>. Acesso em: 10 out. 2023

BRASIL. **Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes e corretivos**. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA, 2017.

BRASIL. **Resolução nº 498, de 19 de agosto de 2020**. . Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biofertilizante em solos, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Edição 161, Seção 1, p. 265. , , 2020a.

BRASIL. **Instrução Normativa nº 61, de 08 de julho de 2020**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de defesa Agropecuária. Diário Oficial da União, Brasília, 15 de julho de 2020. Seção 1, , 8 jul. 2020b. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/fertilizantes/legislacao/in-61-de-8-7-2020-organicos-e-biofertilizantes-dou-15-7-20.pdf>>. Acesso em: 8 out. 2023

BRASIL. **Plano Nacional de Fertilizantes PNF 2050. Uma Estratégia para os Fertilizantes no Brasil**. Brasília, DF: Presidência da República. Secretaria Especial de Assuntos Estratégicos, 2021. v. 1

BRASIL. **Governo Federal lança Plano Nacional de Fertilizantes para reduzir importação dos insumos**. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/governo-federal-lanca-plano-nacional-de-fertilizantes-para-reduzir-importacao-dos-insumos>>. Acesso em: 7 out. 2022a.

BRASIL. **Decreto nº 10.991, de 11 de março de 2022**. Presidência da República. Institui o Plano Nacional de Fertilizantes 2022-2050 e o Conselho Nacional de Fertilizantes e Nutrição de Plantas. Diário Oficial da União, Seção 1, Edição Extra - A , p. 1., , 11 mar. 2022b.

CALZADA, J.; D'ANGELO, G. **Demandantes y exportadores de fertilizantes en el mundo**. Disponível em: <<https://www.bcr.com.ar/es/mercados/investigacion-y-desarrollo/informativo-semanal/noticias-informativo-semanal/demandantes-y>>. Acesso em: 7 out. 2023.

CANTARELLA, H. **Fertilizantes, Sustentabilidade e Nutrientes para a vida no Brasil**. 7o Congresso Brasileiro de Fertilizantes. **Anais...** Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA)., out. 2018. Disponível em: <https://anda.org.br/wp-content/uploads/2018/10/Fertilizantes_Sustentabilidade_NutrientesparaavidanoBrasil.pdf>. Acesso em: 4 out. 2023

CASTRO, L. et al. Low cost digester monitoring under realistic conditions: Rural use of biogas and digestate quality. **Bioresource Technology**, v. 239, p. 311–317, set. 2017.

CESARO, A. The valorization of the anaerobic digestate from the organic fractions of municipal solid waste: Challenges and perspectives. **Journal of Environmental Management**, v. 280, p. 111742, fev. 2021.

CHAGAS, A. P. A síntese da amônia: alguns aspectos históricos. **Química Nova**, v. 30, n. 1, p. 240–247, fev. 2007.

CPLEN. **Fotos**. Disponível em: <cplen.iee.usp.br>. Acesso em: 6 out. 2023.

CPLEN. **Sistema de Biodigestão Anaeróbica. Descrição da Operação - Usina Experimental Biogás USP. Manual de Operação** São Paulo. Centro de Análise Planejamento e Desenvolvimento de Recursos Energéticos. Instituto de Energia e Ambiente. Universidade de São Paulo., 12 maio 2022.

D'AQUINO, C. A. **Geração de energia por biogás a partir de resíduos orgânicos: estudo de caso da Cidade Universitária da USP**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 14 jan. 2020.

DROSG, B. et al. **Nutrient recovery by biogas digestate processing**. [s.l.] IEA Bioenergy Dublin, 2015.

EHMANN, A.; THUMM, U.; LEWANDOWSKI, I. Fertilizing Potential of Separated Biogas Digestates in Annual and Perennial Biomass Production Systems. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 2, p. 358685, 24 abr. 2018.

EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília: Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009., 2009.

ESALQ. **Tabela de Preços. Serviços de Análise do Solo**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - USP, 2023.

FIELD, J. A. et al. Fertilizer Recovery from Anaerobic Digesters. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, v. 27, n. 6, p. 1871–1876, 1881, nov. 1984.

GIZ. Digestate as Fertilizer. Em: [s.l.] German Biogas Association (Fachverband Biogas e.V.) and Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, 2018. p. 1–64.

GUILAYN, F. et al. First fertilizing-value typology of digestates: A decision-making tool for regulation. **Waste Management**, v. 86, p. 67–79, mar. 2019.

GUILAYN, F. et al. Valorization of digestates from urban or centralized biogas plants: a critical review. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 19, n. 2, p. 419–462, 9 jun. 2020.

HERBES, C. et al. Economic assessment of different biogas digestate processing technologies: A scenario-based analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 255, p. 120282, 2020.

JIMENEZ, J. et al. The impact of biogas digestate typology on nutrient recovery for plant growth: Accessibility indicators for first fertilization prediction. **Waste Management**, v. 117, p. 18–31, 2020.

KOSZEL, M.; LORENCOWICZ, E. Agricultural Use of Biogas Digestate as a Replacement Fertilizers. **Agriculture and Agricultural Science Procedia**, v. 7, p. 119–124, 2015.

LAMOLINARA, B. et al. Anaerobic digestate management, environmental impacts, and techno-economic challenges. **Waste Management**, v. 140, p. 14–30, mar. 2022.

LOPES, A. S. **Manual internacional de fertilidade do solo**. 2. ed. Piracicaba: Instituto da Potassa & Fosfato, 1998. v. 1

LU, J.; XU, S. Post-treatment of food waste digestate towards land application: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 303, p. 127033, jun. 2021.

MACHADO, L. T. S. **Aproveitamento de efluente gerado na biodigestão anaeróbia de resíduos orgânicos de origem doméstica na agricultura irrigada**. Dissertação (Mestrado)—Botucatu: Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Faculdade de Ciências Agrônômicas. UNESP Botucatu, 2022.

MALAVOLTA, E. **Manual de química agrícola: nutrição de plantas e fertilidade do solo**. [s.l.] Agronômica Ceres São Paulo, 1976.

MALAVOLTA, E. **Manual de química agrícola: adubos e adubação**. Agronômica Ceres, São Paulo, 1981.

MATOS, C. F. **Produção de biogás e biofertilizante a partir de dejetos de bovinos, sob sistema orgânico e convencional de produção**. [s.l.] Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 26 fev. 2016. Disponível em: <<https://tede.ufrj.br/handle/jspui/1140>>. Acesso em: 4 out. 2023.

MENG, X. et al. Food waste anaerobic biogas slurry as fertilizer: Potential salinization on different soil layer and effect on rhizobacteria community. **Waste Management**, v. 144, n. March, p. 490–501, 2022.

MIKKELSEN, R. L. The “4R” Nutrient Stewardship Framework for Horticulture. **HortTechnology**, v. 21, n. 6, p. 658–662, dez. 2011.

MÖLLER, K.; MÜLLER, T. Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review. **Engineering in Life Sciences**, v. 12, n. 3, p. 242–257, 11 jun. 2012.

NORDELL, E. et al. Thermal post-treatment of digestate in order to increase biogas production with simultaneous pasteurization. **Journal of Biotechnology**, v. 344, p. 32–39, jan. 2022.

PENG, W.; PIVATO, A. Sustainable Management of Digestate from the Organic Fraction of Municipal Solid Waste and Food Waste Under the Concepts of Back to Earth Alternatives and Circular Economy. **Waste and Biomass Valorization**, v. 10, n. 2, p. 465–481, 7 fev. 2019.

PINTO, L. P. et al. Levantamento de dados sobre os dejetos suínos e suas características. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 3, n. 3, p. 179–187, 2014.

REETZ JR., H. F. **Fertilizers and their Efficient Use**. Paris, France: International Fertilizer Industry Association (IFA), 2016.

SANTA CATARINA. **Lei nº. 14675/09 de 13 de abril de 2009**. . Governo do Estado de Santa Catarina. Estabelece normas aplicáveis ao Estado de Santa Catarina, visando à proteção e à melhoria da qualidade ambiental no seu território. Diário Oficial: 18.585 de 14/04/09. , , 2009. Disponível em: <http://leis.alesec.sc.gov.br/html/2009/14675_2009_lei.html>. Acesso em: 10 out. 2023

SANTA CATARINA. **Instrução Normativa nº 11 suinocultura, agosto de 2021**. Instituto do Meio Ambiente de Santa Catarina. Definir a documentação necessária ao licenciamento e estabelecer critérios para apresentação dos planos, programas e projetos ambientais para implantação de atividades relacionadas à suinocultura de pequeno, médio e grande porte, incluindo tratamento de resíduos líquidos, tratamento e disposição de resíduos sólidos, emissões atmosféricas, ruídos e outros passivos ambientais, , 2021.

SÃO PAULO. **Norma Técnica P4-002 Efluentes e lodos fluidos de indústrias cítricas - Critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola**. . Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - Cetesb Diário Oficial do Estado de São Paulo – Caderno Executivo I, v.120, nº.178, de 18/09/10, Poder Executivo, Seção I, p.71., , 2010. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/normas-tecnicas-cetesb/normas-tecnicas-vigentes/>>. Acesso em: 10 out. 2023

SÃO PAULO. **Processo de revisão da Norma Técnica Cetesb P4.002 – Efluentes e lodos fluidos de indústrias cítricas - Critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola**. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - Cetesb Diário Oficial do Estado de São Paulo – Caderno Executivo I, v.120, nº.178, de 18/09/10, Poder Executivo, Seção I, p.71., , 2019. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/normas-tecnicas-cetesb/normas-tecnicas-vigentes/>>. Acesso em: 10 out. 2023

SHARMA, P. et al. Food waste digestate as biofertilizer and their direct applications in agriculture. **Bioresource Technology Reports**, v. 23, p. 101515, set. 2023.

SIGURNJAK, I. et al. Fertilizer performance of liquid fraction of digestate as synthetic nitrogen substitute in silage maize cultivation for three consecutive years. **Science of The Total Environment**, v. 599–600, p. 1885–1894, dez. 2017.

SIMON, F. W. **Valorização do digestato proveniente da digestão anaeróbica de resíduos alimentares**. Florianópolis: Universidade Federal De Santa Catarina Centro Tecnológico Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, 2020.

SINGH, P. et al. Biofertilization of biogas digestates: An insight on nutrient management, soil microbial diversity and greenhouse gas emission. Em: **New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering**. [s.l.] Elsevier, 2022. p. 199–215.

SLEPETIENE, A. et al. The potential of digestate as a biofertilizer in eroded soils of Lithuania. **Waste Management**, v. 102, p. 441–451, fev. 2020.

SMIL, V. Nitrogen and Food Production: Proteins for Human Diets. **Ambio**, v. 31, n. 2, p. 126–131, 2002.

SONG, S. et al. Food-waste anaerobic digestate as a fertilizer: The agronomic properties of untreated digestate and biochar-filtered digestate residue. **Waste Management**, v. 136, p. 143–152, dez. 2021.

TAMBONE, F. et al. Solid and liquid fractionation of digestate: Mass balance, chemical characterization, and agronomic and environmental value. **Bioresource Technology**, v. 243, n. June, p. 1251–1256, 2017.

TANG, Y. et al. Effects of Biogas Slurry Application on Crop Production and Soil Properties in a Rice–Wheat Rotation on Coastal Reclaimed Farmland. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 230, n. 3, p. 51, 9 mar. 2019.

TUSZYNSKA, A.; WILINSKA, A.; CZERWIONKA, K. Phosphorus and nitrogen forms in liquid fraction of digestates from agricultural biogas plants. **Environmental Technology (United Kingdom)**, v. 42, n. 25, p. 3942–3954, 2021.

USEPA. Acid Digestion of Waters for Total Recoverable or Dissolved Metals for Analysis by Flame Atomic Absorption (FLAA) or Inductively Coupled Plasma (ICP) Spectroscopy. Test Method 3005A. Em: **Resource Conservation and Recovery Act. Hazardous Waste Test Methods. SW-846**. [s.l.] USEPA - United States Environmental Protection Agency, 1992.

VALENTINUZZI, F. et al. The fertilising potential of manure-based biogas fermentation residues: pelleted vs. liquid digestate. **Heliyon**, v. 6, n. 2, p. e03325, fev. 2020.

WEIMERS, K. et al. Liquid Anaerobic Digestate as Sole Nutrient Source in Soilless Horticulture—Or Spiked With Mineral Nutrients for Improved Plant Growth. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, n. March, p. 1–13, 2022.

YU, Y. et al. Comprehensive insights into the organic fractions on solid–liquid separation performance of anaerobic digestates from food waste. **Science of The Total Environment**, v. 800, p. 149608, dez. 2021.

ZHANG, H. et al. The effects of salinity and osmotic stress on barley germination rate: sodium as an osmotic regulator. **Annals of Botany**, v. 106, n. 6, p. 1027–1035, dez. 2010.

Memorial de cálculo

RAS

| Elemento | Concentração em g/kg | | | | |
|------------------|----------------------|-----|------|-----|------|
| Sódio (Na) Total | 0,175 | 0,4 | 1,75 | 1,9 | 2,25 |

| | | | | | |
|---------------------|------|------|------|------|------|
| Cálcio (Ca) Total | 0,46 | 0,36 | 0,35 | 0,52 | 0,4 |
| Magnésio (Mg) Total | 0,11 | 0,1 | 0,11 | 0,14 | 0,11 |

Conversão para mmolc

| Elemento | Concentração em mmolc | | | | |
|---------------------|-----------------------|------|-------|-------|-------|
| Sódio (Na) Total | 8,75 | 20 | 87,5 | 95 | 112,5 |
| Cálcio (Ca) Total | 51,11 | 40 | 38,89 | 57,77 | 44,44 |
| Magnésio (Mg) Total | 4,78 | 4,34 | 4,78 | 6,08 | 4,78 |