

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ – UNIOESTE**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS – CAMPUS CASCAVEL**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**CODIGESTÃO ANAERÓBIA DE RESÍDUOS DE FRUTAS E VERDURAS COM ÁGUA**  
**RESIDUÁRIA DA BOVINOCULTURA DE LEITE**

**BRUNA HINTERHOLZ**

**CASCAVEL – PARANÁ – BRASIL**

**AGOSTO DE 2022**

**BRUNA HINTERHOLZ**

**CODIGESTÃO ANAERÓBIA DE RESÍDUOS DE FRUTAS E VERDURAS COM ÁGUA  
RESIDUÁRIA DA BOVINOCULTURA DE LEITE**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), em cumprimento aos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração de recursos Hídricos e Saneamento ambiental.

Orientadora: Profa. Dra. Mônica Sarolli Silva de Mendonça Costa

Coorientador: Prof. Dr. Jorge de Lucas Júnior

**CASCADEL – PARANÁ – BRASIL**

**AGOSTO DE 2022**

Ficha de identificação da obra elaborada através do Formulário de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da Unioeste.

Hinterholz, Bruna  
Codigestão anaeróbia de resíduos de frutas e verduras com  
água residuária da bovinocultura de leite / Bruna  
Hinterholz; orientadora Mônica Sarolli Silva de Mendonça  
Costa; coorientador Jorge de Lucas Júnior. -- Cascavel,  
2023.  
51 p.

Dissertação (Mestrado Acadêmico Campus de Cascavel) --  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Centro de Ciências  
Exatas e Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Agrícola, 2023.

1. Resíduos de frutas e verduras. 2. Codigestão anaeróbia.  
3. Água residuária da bovinocultura de leite. 4.  
Biofertilizante. I. Costa, Mônica Sarolli Silva de Mendonça ,  
orient. II. Lucas Júnior, Jorge de , coorient. III. Título.

## **BRUNA HINTERHOLZ**

### **CODIGESTÃO ANAERÓBIA DE RESÍDUOS DE FRUTAS E VERDURAS COM ÁGUA RESIDUÁRIA DA BOVINOCULTURA DE LEITE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, linha de pesquisa: Saneamento Ambiental, APROVADA pela seguinte banca examinadora:



Orientadora - Monica Sarolli Silva de Mendonça Costa  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)



Thiago Edwiges

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)



Documento assinado digitalmente  
JACKELINE TATIANE GOTARDO  
Data: 31/10/2023 10:55:01-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Jackeline Tatiane Gotardo  
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Campus de Cascavel (UNIOESTE)

Cascavel, 01 de agosto de 2022.

## BIOGRAFIA

**BRUNA HINTERHOLZ** – Filha de Mirca Maria Hinterholz, nascida em 09 de maio de 1987, natural da cidade de Foz do Iguaçu, estado do Paraná. Em 2010 graduou-se em Tecnologia em Gestão Ambiental pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), campus de Medianeira. No ano de 2013, concluiu o curso de pós-graduação (lato sensu) em Engenharia de Segurança do Trabalho pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), campus Medianeira. Em 2020, graduou-se em Engenharia Ambiental pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), campus de Medianeira. No início do ano de 2020, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), campus de Cascavel, área de concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, atuando na linha de pesquisa de Saneamento Ambiental.

*“Não fui eu que ordenei a você? Seja forte e corajoso!  
Não se apavore nem desanime, pois o Senhor, o seu  
Deus, estará com você por onde você andar”. Josué  
1:9.*

Dedico esta dissertação a minha família: pelo amor incondicional a minha filha, Lívia Hinterholz Franzon, e ao meu esposo, Marcelo Franzon que sempre esteve ao meu lado e fez de tudo que era possível e impossível para me apoiar e incentivar à obtenção do título de Mestre. Amo vocês!

## AGRADECIMENTOS

Ao Deus trino, pelo dom da vida, pela fé, pela saúde e por ter colocado pessoas especiais no decorrer do mestrado e da vida;

Aos meus pais, Antônio Hélio Serrate de Andrade e Mirca Maria Hinterholz, por todo amor, zelo, admiração e orações durante este período e toda a minha vida. À minha irmã Juliana Hinterholz de Andrade, meu cunhado Marcos Johann e minha sobrinha Laura Valentina Hinterholz de Andrade pelo carinho e afeto. A toda a minha família de Foz do Iguaçu, pelo apoio e por compreenderem minhas ausências durante o mestrado. Amo vocês!

À Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), campus Cascavel, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PGEAGRI), pela oportunidade e pela estrutura para a realização deste curso;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de mestrado;

À professora Dra. Mônica Sarolli Silva de Mendonça Costa, pela orientação, compreensão, paciência, incentivo, ensinamentos, por toda sua dedicação profissional e pessoal pelo ensino e pesquisa e por toda oportunidade de aprendizado que tornou possível a concretização desta dissertação;

Ao professor e coorientador Dr. Jorge de Lucas Júnior, pelas contribuições e orientações fundamentais para minha dissertação;

Aos demais professores do RHESA, pelos ensinamentos transmitidos, conversas pelos corredores e por todo apoio durante este período;

Aos membros da banca, pela leitura e contribuição para melhoria deste trabalho;

Ao Edison Barbosa da Cunha, técnico do laboratório de saneamento, pelo auxílio nas análises químicas e ao técnico administrativo Euro Kava Kailer por estar disposto a ajudar sempre que preciso;

À colega Marianna Câmara Gomes, lá do norte de Minas, por aceitar dividir os trabalhos com o reator semicontínuo T1, pela paciência e por toda a ajuda necessária para a realização deste trabalho;

À equipe do Laboratório de Análises de Resíduos Agroindustriais (LARA), ou carinhosamente aos “Monicats” (Edilene, Eduardo, Jéssica e Riteli), pela amizade, convívio, pelos momentos de confraternização e descontração e principalmente por todo o auxílio na elaboração desta dissertação. Gratidão!

Às meninas do Laboratório de Reatores Biológicos (LAREB) (Aruani, Eliandra, Luana e Tamires), pelas conversas nos corredores, pela amizade e por toda ajuda necessária para concluir este trabalho;



Às colegas Cleuciane Nascimento, Natalia Pereira, Ellen Lemes e a Anna Paula Pôncio, por todo o auxílio nos laboratórios e pelos incentivos à pesquisa;

Aos ICs (João, Natan e Isadora) do Laboratório de Análises de Resíduos Agroindustriais (LARA), por todo o auxílio e as conversas nos momentos de correria de análises;

Ao Jakson Bonfinger, coordenador do Banco de Alimentos de Cascavel, por todo o auxílio para conseguir os resíduos de frutas e verduras;

Ao amigo Daniel Jesuino Gris, pela colaboração com os desenhos gráficos;

À querida Marivane Turim Koschevic, por ser minha amiga-irmã que a vida me presenteou, por todo o incentivo, carinho e auxílio em todos os momentos que precisei;

À família Ferreira (em especial a Gilvania, minha comadre e amiga), pela preocupação, pelas jantas e principalmente por cuidar da minha filha nos momentos em que precisei estar ausente;

À minha sogra, Marlene de Jesus Alves da Costa, por todas orações e carinho, pelas “marmitinhas com comidinhas caseiras e saborosas” e por cuidar tão bem da minha filha em todos os momentos em que precisei;

Às minhas amigas Aline Lujan e Franciele Mendes Massuia, pelo carinho e o incentivo e por entenderem minha ausência nos últimos meses;

Às minhas fiéis companheiras (minhas cachorrinhas: Bisteca e Pimenta), por todo o amor, pela alegria no fim do dia e por carregarem minhas energias diariamente;

Finalmente, a todos que de forma direta ou indireta colaboraram para a concretização deste trabalho tão importante para minha vida. Muito Obrigada!

## **CODIGESTÃO ANAERÓBIA DE RESÍDUOS DE FRUTAS E VERDURAS COM ÁGUA RESIDUÁRIA DA BOVINOCULTURA DE LEITE**

Hinterholz, Bruna. Codigestão anaeróbia de resíduos de frutas e verduras com água residuária da bovinocultura de leite. Orientadora: Mônica Sarolli Silva de Mendonça Costa. Coorientador: Jorge de Lucas Júnior. 2023. 51f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, PR, 2023.

### **RESUMO**

Os resíduos de frutas e verduras (RFV) compõem uma grande parcela dos resíduos orgânicos que, por sua vez, compõem uma quantidade expressiva dos resíduos sólidos urbanos (RSU) coletados no Brasil, sendo que a maior parte não recebe o tratamento adequado. Este fato pode ocasionar a redução da vida útil de aterros sanitários e gerar maiores problemas. As centrais de abastecimentos (CEASA) diariamente descartam uma expressiva quantidade de resíduos de frutas e verduras, e estes resíduos podem ser aproveitados para produção de energia e fertilizante por meio do processo de digestão anaeróbia (DA). Entretanto, dadas as características dos RFV, a codigestão (quando adicionados dois ou mais substratos) é uma das estratégias que viabilizam o processo. Desta forma, o objetivo deste trabalho consistiu em estudar a codigestão anaeróbia de RFV com a água residuária da bovinocultura de leite (ARBL), comparando com a monodigestão tanto dos resíduos de frutas e verduras como com a monodigestão da água residuária da bovinocultura de leite. Foram utilizados reatores anaeróbios tubulares de regime semicontínuo com capacidade de 60,0 L mantidos em temperaturas mesofílicas, com tempo de retenção hidráulica de 30 dias e avaliados três tratamentos com cinco repetições em triplicata ( $T_1$ : RFV, água e reciclo;  $T_2$ : RFV com ARBL em codigestão e  $T_3$  apenas ARBL), os quais consistiram em proporções (%) com progressão de cargas distintas de resíduos de frutas e verduras (iniciando com 1, 1,5, 2, 2,5, 3% até 3,5% de sólidos totais – ST) no  $T_1$  e  $T_2$ ; com intuito de avaliar o efeito da codigestão nos potenciais de produção de biogás e metano, bem como na qualidade do biofertilizante quando comparado à monodigestão. Ao longo do experimento observou-se que o sistema respondeu de forma positiva às progressões de carga até os 3,5% de ST, o que demonstrou o aumento significativo da produção de biogás. Portanto, a codigestão anaeróbia é uma alternativa relevante para a reciclagem da energia e dos nutrientes contidos nos resíduos de frutas e verduras e água residuária da bovinocultura de leite.

**Palavras-chave:** resíduos de frutas e verduras; codigestão anaeróbia; água residuária da bovinocultura de leite; biogás, biofertilizante.

## **ANAEROBIC CODIGESTION OF FRUIT AND VEGETABLES WASTEWATER WITH MILK CATTLE WASTEWATER**

Hinterholz, Bruna. Codigestão anaeróbia de resíduos de frutas e verduras com água residuária da bovinocultura de leite. Advisor: Mônica Sarolli Silva de Mendonça Costa. Coadvisor: Jorge de Lucas Júnior. 2023. 51p. Dissertation (Masters in Agricultural Engineering) – Graduate Program in Agricultural Engineering. Western Paraná State University, Cascavel, PR, 2023.

### **ABSTRACT**

Fruit and vegetable residues (FVR) makes up a large portion of organic waste, which, in turn, adds up to an expressive amount of urban solid waste collected in Brazil, and most of it does not receive adequate treatment. This fact can reduce the useful life of sanitary landfills and generate great problems. The supply centers (CEASA) daily discard a significant amount of FVR, and these residues can be used for energy and fertilizer production through anaerobic digestion (AD) process. However, given the characteristics of FVR, co-digestion (when two or more substrates are added) is one of the strategies that can make the process viable. Thus, the objective of this work was to study the anaerobic co-digestion of FVR with dairy cattle wastewater (DCWW), comparing with the monodigestion of both FVR and DCWW. Semi-continuous tubular anaerobic reactors with a capacity of 60.0 L maintained at mesophilic temperatures, with a hydraulic retention time of 30 days, were employed and three treatments were evaluated with five replications in triplicate (T<sub>1</sub>: FVR, water and recycle; T<sub>2</sub>: FVR with DCWW in co-digestion and T<sub>3</sub> only DCWW), which consisted of proportions (%) with progression of different loads of FVR (starting with 1, 1.5, 2, 2.5, 3% until 3.5% total solids – TS) in T<sub>1</sub> and T<sub>2</sub>; in order to evaluate the effect of co-digestion on biogas and methane production potentials as well as on the quality of the biofertilizer when compared to monodigestion. Throughout the experiment, it was observed that the system responded to the positive progressions of 3.5% increase in TS, which increases the increase in biogas production. Therefore, anaerobic co-digestion is a relevant alternative for recycling energy and nutrients contained in fruit and vegetable residues and wastewater from dairy cattle.

**Keywords:** fruit and vegetable residues; anaerobic codigestion; wastewater from dairy cattle; biogas, biofertilizer.

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	xii
LISTA DE FIGURAS.....	xiii
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>3</b>
2.1 Objetivo geral.....	3
2.2 Objetivos Específicos.....	3
<b>3 REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>4</b>
3.1 Perspectiva geral da gestão de resíduos alimentares .....	4
3.2 Aspectos gerais da gestão de resíduos na bovinocultura do Brasil.....	6
3.3 Sinergia no tratamento de resíduos de frutas e verduras e da bovinocultura de leite por digestão e codigestão anaeróbia .....	8
3.4 A biomassa como fonte de energia renovável na produção de biogás.....	11
3.5 Obtenção e aplicações do biofertilizante .....	13
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>15</b>
4.1 Descrição do local de estudo .....	15
4.2 Coleta e caracterização do inóculo e dos substratos .....	15
<b>4.3 Ensaio semicontínuo .....</b>	<b>18</b>
4.4 Métodos Analíticos.....	20
4.5 Análises estatísticas .....	21
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>22</b>
5.1 Estratégias para partida dos reatores .....	22
5.2 Produção específica de biogás e metano .....	23
Tratamento .....	23
5.3 Remoção de material orgânico .....	24
5.4 Estabilidade do processo .....	25
5.5 Recuperação dos nutrientes pelo biofertilizante .....	26
<b>6 CONCLUSÕES .....</b>	<b>31</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>32</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Caracterização físico-química dos RFVs, da ARBL e da CoDA .....	18
Tabela 2 Composição dos tratamentos nos reatores semicontínuos .....	18
Tabela 3 Produção específica de biogás da monodigestão e codigestão de RFV e ARBL...	23
Tabela 4 Caracterização dos efluentes e afluentes e teores de remoção do material orgânico dos tratamentos .....	25
Tabela 5 Concentrações das alcalinidades.....	26
Tabela 6 Teores de macronutrientes primários e secundários no biofertilizante em cada situação estudada .....	27
Tabela 7 Teores de micronutrientes no biofertilizante em cada situação estudada.....	28
Tabela 8 Quantidades (em kg) de adubos minerais recuperados no biofertilizante, a cada tonelada de sólidos totais.....	29

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Uma estrutura conceitual para perdas e desperdícios de alimentos. ....	5
Figura 2 Esquema representativo do manejo de RFVs realizado pelo CEASA-PR.....	6
Figura 3 Modelo de economia circular proposta por Negri et al. (2020). ....	8
Figura 4 Representação esquemática das etapas do processo de DA.....	9
Figura 5 Requisitos ambientais dos microrganismos anaeróbios mesofílicos. ....	10
Figura 6 - Matriz Energética Brasileira 2020.....	12
Figura 7 A: Biodigestor anaeróbio; B: Duto de saída do (inóculo) biofertilizante.....	16
Figura 8 Resíduos de Frutas e Verduras (RFVs). a) banana, b) batata, c) beterraba, d) cebola, e) cenoura, f) chuchu, g) mamão, h) manga, i) melancia e j) tomate. ....	17
Figura 9 Água Residuária da Bovinocultura de Leite. ....	17
Figura 10 Desenho esquemático do reator modelo semicontínuo. ....	19
Figura 11 Volume de produção de biogás (L.d-1) referente à progressão de carga de ST (%). T1: MonoDA RFV; T2: CoDA RFV e ARBL; T3: MonoDA ARBL. ....	23

## 1 INTRODUÇÃO

Os chamados resíduos de alimentos englobam as frutas e verduras. No Brasil, as Centrais de Abastecimento (CEASAs) são responsáveis pela distribuição de produtos hortigranjeiros, o que incluem frutas e verduras.

No município de Cascavel, PR, os produtos considerados não comercializáveis, devido ao tamanho ou pequena injúria, são destinados ao banco de alimentos. O banco de alimentos é coordenado pelo município em parceria com o CEASA, cujo objetivo é diminuir o desperdício de alimentos e oferecer às famílias carentes e aos centros de referência em assistência social. As frutas e verduras distribuídas pelo Banco de Alimento não são comercializáveis, mas são consumíveis. Apenas quando as frutas e verduras não são nem comercializáveis e nem consumíveis são classificadas como resíduos, e no município de Cascavel esse montante gerado está entre 5 e 8 toneladas por semana.

A destinação dada aos resíduos de frutas e verduras no município de Cascavel é o aterro sanitário. Entretanto, este resíduo pode ser destinado aos processos biológicos de estabilização, como a compostagem, a vermicompostagem e a digestão anaeróbia. Os referidos processos apresentam vantagens e desvantagens e podem ser incluídos em diferentes arranjos tecnológicos.

No caso da digestão anaeróbia (DA), as vantagens são a promoção do saneamento ambiental, a produção de energia (biogás/metano) e de biofertilizante (nutrientes). As desvantagens estão na facilidade de acidificação devido à velocidade na hidrólise e no destino do biofertilizante quando o processo de DA ocorre nas CEASAs.

Dentre as estratégias para diminuir a acidificação durante a hidrólise estão a codigestão anaeróbia (CoDA) com resíduos animais e o reciclo (reuso do biofertilizante na composição da carga diária). Ambas as estratégias podem também solucionar total ou parcialmente o destino do biofertilizante.

O mecanismo envolvido em ambas as estratégias para diminuir a acidificação causada pela hidrólise rápida dos carboidratos de fácil degradação contidos nos resíduos de frutas e verduras (RFV) é o mesmo. A presença de compostos nitrogenados provenientes da degradação de proteínas possibilita a capacidade tampão, fornecendo alcalinidade e reestabelecendo o equilíbrio nas fases acetogênica e metanogênica.

No caso da CoDA, a sinergia entre os resíduos possibilita incremento na produção de biogás quando comparada à MonoDA dos resíduos separadamente. O uso de reciclo, por outro lado, favorece o processo de MonoDA, aumenta a concentração dos nutrientes e ainda promove economia de água potável para diluição dos RFV, o que gera menor produção do efluente. Esta última vantagem é necessária quando a logística para uso agrícola do biofertilizante não é favorável.

A definição dos dois cenários amplia as possibilidades de destinação de um mesmo resíduo. No cenário em que os RFV são estabilizados nas CEASAs, são favorecidos o saneamento ambiental e a geração de energia. No meio rural é possível atingir as três vantagens do processo (saneamento ambiental e as reciclagens agrônômica e energética dos RFV).

De qualquer maneira, a tomada de decisão envolve um planejamento e, para tanto, informações sobre os diferentes cenários são essenciais para esses estudos. Entretanto, as informações necessárias, embora possam ser colhidas na literatura, tornam o uso das ferramentas mais robusto quando obtidas localmente, dadas as peculiaridades edafoclimáticas, sociais, culturais e econômicas da região. Tais informações são valiosas para uma tomada de decisão mais próxima da realidade.

Assim, o objetivo deste trabalho foi obter informações sobre a recuperação de energia e de nutrientes nos três cenários envolvendo a DA de RFV, ou seja, as monodigestões anaeróbias de RFV e água residuária da bovinocultura de leite (ARBL) e a codigestão de ambos os resíduos.



## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Submeter os resíduos de frutas e verduras aos processos de monodigestão e codigestão anaeróbia com água residuária da bovinocultura de leite, avaliando os efeitos sobre a reciclagem energética e de nutrientes.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Caracterizar os substratos a partir de parâmetros físico-químicos;
- Avaliar o potencial de produção de biogás e metano;
- Verificar a estabilidade do processo;
- Determinar a qualidade do biofertilizante obtido.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 Perspectiva geral da gestão de resíduos alimentares

Os produtos agroalimentares são essenciais à dieta e à nutrição humana. Com o aumento do crescimento populacional mundial, a demanda por alimentos também elevou-se, conseqüentemente a produção mundial de alimentos tende a apresentar um crescimento relevante e notório nos mais diversos campos da produção agrícola, como cereais, frutas e legumes, carne, leite, entre outros (CHERUBINI, 2015; MATOS, 2021). Em contrapartida, na perspectiva ambiental da produção de alimentos, destacam-se as perdas e os resíduos gerados neste processo.

Durante o processamento, toneladas de subprodutos são geradas e muitas vezes consideradas como resíduos destinados a serem descartados. Infelizmente, a maioria dos chamados resíduos contém alto teor de materiais valiosos que podem ser reutilizados, valorizados ou melhorados para agregação de valor. O descarte desses resíduos geralmente resulta em poluição ou danos ambientais com graves conseqüências para o clima e a vida biótica (ONYEAKA; NWABOR, 2022).

A intensificação da taxa de industrialização, bem como a urbanização e a gestão inadequada de resíduos, também resultou no acúmulo de um grande volume de resíduos alimentares. Um terço dos alimentos produzidos para consumo humano é desperdiçado durante alguma das fases de colheita, produção, manuseio e armazenamento. A geração global de resíduos sólidos urbanos foi responsável por aproximadamente 2 bilhões de toneladas ano<sup>-1</sup>, dos quais mais da metade dos resíduos municipais foi responsável pelo desperdício de alimentos nos países em desenvolvimento (CHHANDAMA, 2022; NEGRI, 2020; SHAFIEE-JOOD; CAI, 2016).

De acordo com a FAO (2019), a perda e o desperdício de alimentos são entendidos como a diminuição da quantidade ou qualidade dos alimentos ao longo da cadeia de abastecimento alimentar. A

Figura 1 apresenta uma estrutura conceitual de aplicação geral para definir a perda de alimentos e resíduos.



Figura 1 Uma estrutura conceitual para perdas e desperdícios de alimentos. Fonte: FAO (2019).

No Brasil, a Lei 12.305/2010 institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que estabelece em seu artigo 9º a seguinte ordem de prioridade na gestão e no gerenciamento de resíduos sólidos: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (BRASIL, 2010). Ainda, em seu artigo 20º Inciso V, considera-se que os responsáveis por atividades agrosilvopastoris – caso das atividades pecuária de leite e suínos/aves, e centrais estaduais de abastecimento – ficam obrigados a elaborar seus planos de gerenciamento de resíduos sólidos (PGRS), conforme exigidos pela legislação pertinente.

As Centrais Estaduais de Abastecimento (CEASAs) são empresas estatais ou de capital misto (público e privado), com o objetivo de promover, desenvolver, regular, dinamizar e organizar a comercialização de produtos da hortifruticultura a nível de atacado em uma determinada região e fazem parte do Programa Brasileiro de Modernização do Mercado Hortifrutigranjeiro (WEGNER, 2015).

No intuito de minimizar desperdícios e contribuir com a sociedade, os alimentos que não são comercializados nas unidades da Ceasa do Paraná, como frutas, legumes e verduras que seriam descartados porque não têm valor comercial ou porque têm algum problema na aparência, mas estão próprios para o consumo, são direcionados a instituições filantrópicas e de famílias em situação de vulnerabilidade social, por meio do Banco de Alimentos da Ceasa, conforme o esquema na

Figura 2.

Em junho de 2022, o banco de alimentos do CEASA de Cascavel recebeu cerca de 90.184 kg de produtos; destes, cerca de 49.998 kg foram doados. Ainda, 37.774 kg de hortifrutif

foram descartados. Em um balanço geral para o mês, obteve-se um percentual de 58,11% de aproveitamento, atendendo cerca de 22.317 pessoas e 62 entidades (CEASA/PR, 2022). Contudo, observa-se que uma grande quantidade de resíduos orgânicos é gerada ao final desta redistribuição.

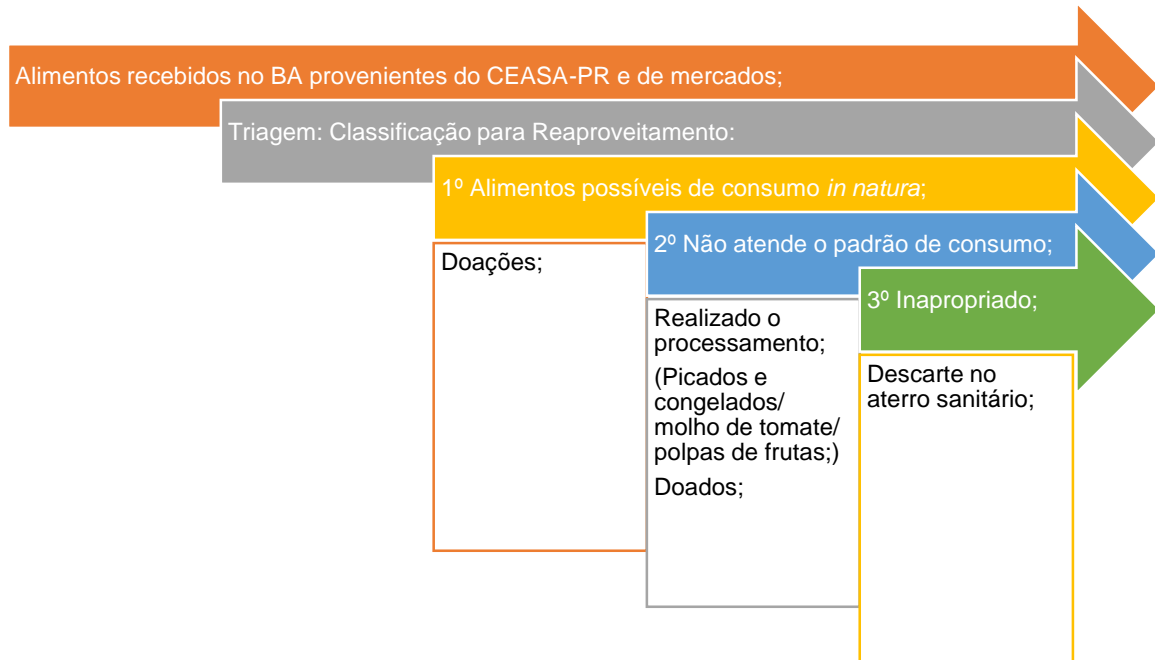


Figura 2 Esquema representativo do manejo de RFVs realizado pelo CEASA-PR.  
Fonte: CEASA/PR (2022).

Esses resíduos de frutas e verduras são geralmente depositados em aterros, fato que pode resultar na geração de um grande volume de gases de efeito estufa, sendo alguns dos mais comuns o metano (CH<sub>4</sub>) e o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (CHHANDAMA et al., 2022).

Dentre os tratamentos possíveis para os resíduos orgânicos gerados por estes processos produtivos estão a compostagem, a digestão anaeróbia e a incineração (DAL BOSCO, 2017). A eliminação de alimentos perdidos ou desperdiçados pode assumir várias formas, com maior ou menor impacto prejudicial para o ambiente. Destacam-se neste contexto a compostagem e a digestão anaeróbia, que têm um impacto ambiental mais limitado do que o despejo de alimentos em aterros sanitários ou incineração (FAO, 2019).

### 3.2 Aspectos gerais da gestão de resíduos na bovinocultura do Brasil

Toda atividade industrial, bem como as atividades agrícolas, está sujeita a geração de resíduos, e estes, de acordo com a legislação, devem ser tratados e destinados adequadamente, para evitar a poluição/contaminações do solo e de recursos hídricos.

A produção de carne e derivados bovinos vem aumentando significativamente nos últimos anos. O movimento do agronegócio da pecuária de corte em 2019 foi de R\$ 618,50 bilhões, 3,5% acima dos R\$ 597,22 bilhões registrados em 2018 (ABITEC, 2020).

Conforme aumenta a produção da pecuária leiteira, observa-se também um aumento expressivo na produção de dejetos desta matriz. No geral, o efluente bruto oriundo dos sistemas de produção de animais é principalmente constituído de fezes, urina, restos de ração, pelos e água desperdiçada nos bebedouros. Esta apresenta altos teores de DQO, DBO, fósforo, cobre e zinco, bem como de nitrogênio (orgânico e amoniacal), além de indicadores de contaminação fecal, como os coliformes termotolerantes (coliformes a 45 °C) (MORAES; PAULA JÚNIOR, 2004; VIVAN, 2010).

A bovinocultura de corte e leite é caracterizada como uma atividade potencialmente poluidora, devido à carga de poluentes que são gerados na atividade. Esses proporcionam a degradação do ar, dos recursos hídricos e do solo. Assim, a degradação biológica dos resíduos – principalmente os dejetos – produzidos por esta atividade pode favorecer a geração de gases tóxicos, alterações das propriedades físicas, químicas e biológicas dos corpos hídricos e contaminação do solo, o que pode acarretar sérios desequilíbrios ambientais (ZHANG, 2008; SANTOS, 2009; COSTA, 2014; MATINC, 2017; ROMANO; SALES, 2017).

Cervi, Esperancini e Bueno (2010) consideram que a produção diária de dejetos de uma vaca em lactação encontra-se no patamar de 50 litros de chorume. Estes valores diários de produção de dejetos variam conforme a alimentação, a quantidade de água fornecida aos animais e a sazonalidade (inverno/verão)(SALES, 2017).

Considera-se ainda que, reversamente a essa problemática da poluição, a biomassa gerada nesses sistemas produtivos pode servir como excelente fonte de energia por meio dos processos de digestão anaeróbia. A digestão anaeróbia produz um efluente com carga poluente muito menor da inicial e o biogás, que por meio de conversores com alta eficiência pode ser convertido em energia elétrica (CATAPAN, 2011).

De acordo com o relatório sobre fertilizantes organominerais de resíduos do agronegócio do BNDES (2017), o déficit estrutural na demanda por macronutrientes no mercado brasileiro pode ser decorrente das restrições estruturais da indústria de produção de fertilizantes. Contudo, a abundante produção de resíduos por alguns setores do agronegócio permite que os nutrientes presentes nesses rejeitos possam ser reaproveitados, reduzindo, assim, a destinação ambientalmente incorreta e atribuindo maior retorno de economia circular ao agronegócio brasileiro. Considera-se que a produção de resíduos dos setores sucroalcooleiro, bovino, suíno e avícola de corte poderia suprir, aproximadamente, metade da demanda de macronutrientes brasileira em um cenário hipotético de aproveitamento de todos os resíduos gerados por esses segmentos. Apenas a conversão dos nutrientes presentes nos

segmentos que apresentam menos desafios logísticos representaria um mercado potencial superior a US\$ 1 bilhão anuais (CRUZ, 2017).

### 3.3 Sinergia no tratamento de resíduos de frutas e verduras e da bovinocultura de leite por digestão e codigestão anaeróbia

Em uma perspectiva de melhorar a economia circular e sustentabilidade dos processos produtivos desde sua geração até a destinação final, Negri (2020) em seu estudo, sugerem um modelo que utilize os resíduos de alimentos, em vez de culturas energéticas, como substrato para a digestão anaeróbica (Figura 3).

Nos últimos anos, a digestão anaeróbia (DA) foi estabelecida com sucesso como tecnologia para o tratamento de resíduos orgânicos. A perspectiva de transformar, por meio de um processo de baixo custo, resíduos orgânicos em biogás, fonte de energia renovável e lucrativa, certamente tem despertado o interesse por essa tecnologia e tem exigido diversos estudos no sentido de desenvolver métodos que possam melhorar seu desempenho e eficiência (ESPOSITO, 2012). A digestão anaeróbia tem sido bastante estudada, pois além de fornecer um tratamento adequado aos resíduos e ser uma técnica economicamente viável, pode agregar valor aos produtos do processo (SALES, 2017).



Figura 3 Modelo de economia circular proposta por Negri et al. (2020).

Fonte: Adaptada de Negri et al. (2020)

A digestão anaeróbia é um processo biológico realizado na ausência de oxigênio, levando à degradação e estabilização da matéria orgânica, em que microrganismos são responsáveis por converter material orgânico em metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ).

O processo geral de conversão anaeróbica é descrito como um processo de quatro etapas complexas (Figura 4): hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, que podem ocorrer simultaneamente em um processo de estágio único ou separadamente em um processo de vários estágios (NEGRI, 2020).

Cada etapa deve ser realizada por diferentes grupos de microrganismos, em simbiose, e podem requerer diferentes condições ambientais. Na primeira fase, hidrólise, compostos de alta massa molecular, como carboidratos, proteínas e lipídeos são quebrados em monômeros por enzimas excretadas pelas bactérias hidrolíticas. Nesta etapa da hidrólise, a velocidade de degradação é considerada limitante para a biodegradação e a produção de biogás, por causa das diferentes características dos substratos, sendo de poucas horas para o grupo de carboidratos e alguns dias para lipídeos e proteínas (DEUBELIN; STEINHAUSER, 2008).

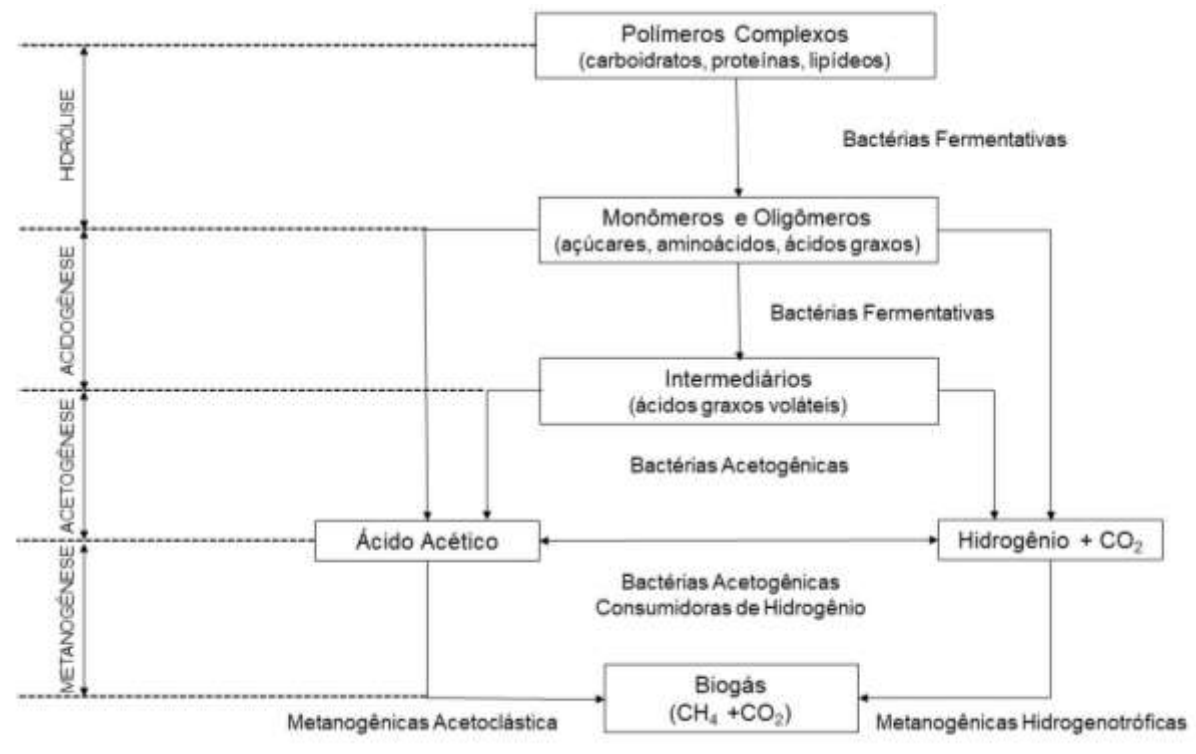


Figura 4 Representação esquemática das etapas do processo de DA.  
Fonte: Adaptado de Chen et al. (2016).

Na acidogênese, a segunda fase da DA, os monômeros formados na fase hidrolítica são utilizados por diferentes bactérias anaeróbicas e facultativas como substrato, que são submetidos a degradação na fase acidogênica a ácidos orgânicos de cadeia curta, como por exemplo: ácido acético, óxidos de nitrogênio, dióxido de carbono, entre outros (KUNZ et al., 2019).

O metabolismo dos microrganismos anaeróbios mesofílicos são dependentes de diversos fatores (Figura 5); com isso, para um ótimo processo de fermentação, múltiplos parâmetros devem ser considerados e controlados.

Parâmetros	Hidrólise/ Acidogênes	Metanogênese
Temperatura	25 - 35	32 - 42
pH	5,2 - 6,3	6,7 - 7,5
Relação C:N	10-45	20-30
Concentração de matéria seca (%)	<40	<30
Potencial Redox (mV)	+ 400 até - 300	<-200
Relação de C:N:P:S necessária	500 : 15 : 5 : 3	600 : 15 : 5 : 3
Elementos traços	-	Essencial: Ni, Co, Mo, Se

Figura 5 Requisitos ambientais dos microrganismos anaeróbios mesofílicos.

Fonte: Kunz; Steinmetz e Amaral (2019b).

Um bom equilíbrio entre as comunidades microbianas que realizam essas etapas, bem como os nutrientes fornecidos, é necessário para um processo de digestão bem-sucedido que proporcionará a maior taxa de conversão de material orgânico em metano. De fato, muitas causas podem afetar negativamente o processo biológico, por exemplo, alta matéria orgânica lábil, teor de sal, óleo e proteína, baixa relação C/N e deficiência de micronutrientes (NEGRI, 2020).

Considerando novas tecnologias nos Estados Unidos, a maioria dos digestores anaeróbios trata os resíduos alimentares em conjunto com outros substratos, principalmente em operações agrícolas. Nessa prática, comumente conhecida como codigestão anaeróbia (CoDA), os resíduos alimentares são co-digeridos com esterco animal, como substrato primário em termos de massa afluente proporcional. Isso permite aumentar as taxas de carga orgânica e melhorar o desempenho em relação à monodigestão, diluindo compostos tóxicos ou inibidores e/ou fornecendo macro ou micronutrientes que podem não estar presentes apenas nos resíduos alimentares (LABATUT, 2011; LABATUT; PRONTO, 2018).

Na CoDA, é importante escolher os melhores co-substrato e proporção de mistura a fim de promover interações positivas, diluir compostos inibitórios e/ou tóxicos, otimizar a produção de metano e preservar a estabilidade do material digerido (ASTALS, 2011).

Com ênfase nas melhorias que a CoDA pode promover, Bolzonella et al. (2006), obtiveram, com a implementação da codigestão de fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos com lodo em uma instalação em grande escala, um aumento na produção de biogás gerado de 600 para 950 m<sup>3</sup>/dia. De acordo com Liu et al. (2012), na comparação de reatores de baixas taxas de carga orgânica e digestor de lodo de estações de tratamento de águas



residuais, obteve-se um aumento, com valores obtidos de 2,4 para 6 kgVS/m<sup>3</sup> dia, quando comparados à utilização da codigestão com resíduos de mercados de frutas e vegetais; assim, considerou-se um aumento diário na produção de biogás de até 100%, juntamente com uma redução nas emissões de gases de efeito estufa (GEE) de 114 para 523 kgCO<sub>2</sub>/tonelada devido à recuperação de energia. Gomez et al. (2006) mostraram que a codigestão do lodo com resíduos de frutas e verduras aumentou a produção de biogás específico de 300 para 800 L/kg SV de abastecimento.

Acerca dos estudos sobre a CoDA, os resultados mostraram um efeito sinérgico. Em particular, a mistura de substratos orgânicos pode resultar em uma razão C/N incluída na faixa ideal 20/1-30/1. Outros benefícios do processo de CoDA são: (1) diluição dos compostos tóxicos potenciais, eventualmente presente em qualquer um dos co-substratos envolvidos; (2) ajuste do teor de umidade e pH; (3) abastecimento da capacidade tampão necessária à mistura; (4) aumento do conteúdo de material biodegradável; (5) ampliando a gama de cepas bacterianas que participam do processo (ESPOSITO, 2012).

A CoDA com resíduos alimentares, contribui com o processo de DA de resíduos/efluentes de origem animal, pois fornece um substrato rico em açúcar e/ou lipídios, onde o nitrogênio não está presente e precisa ser suplementado externamente para fornecer a capacidade tampão (na forma de alcalinidade do bicarbonato) necessária para que o pH do processo seja mantido dentro da faixa ideal (LABATUT; ANGENENT; SCOTT, 2011; LABATUT; PRONTO, 2018). Assim, ao fim do processo essa combinação é capaz de aumentar a produção de biogás (MARAÑÓN , 2012).

### **3.4 A biomassa como fonte de energia renovável na produção de biogás**

A energia é um ingrediente essencial para o desenvolvimento, que é uma das aspirações fundamentais da população dos países da América Latina, Ásia e África. O consumo de energia per capita pode ser usado como um indicador da importância dos problemas que afetam estes países, onde se encontram 70% da população mundial (GOLDEMBERG, 1998).

Enquanto a matriz energética mundial comporta cerca de 14% de energias renováveis, o Brasil possui um total de 48,3% em sua matriz (Figura 6) (BEN INTERATIVO, 2022).

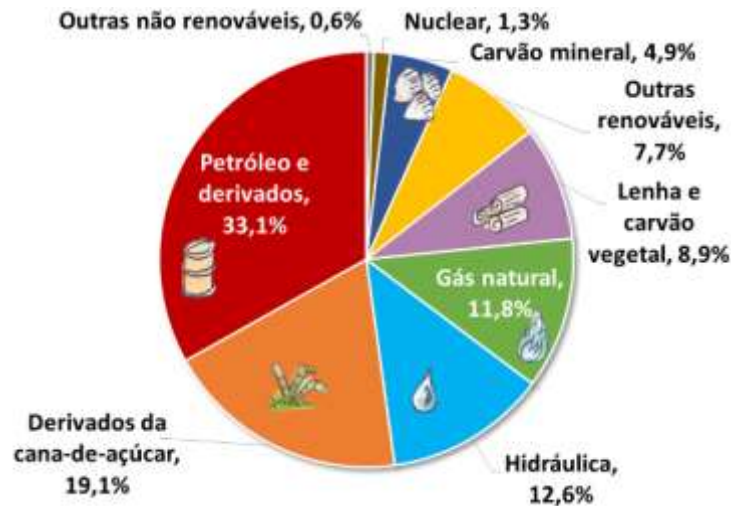


Figura 6 - Matriz Energética Brasileira 2020  
Fonte: Ben Interativo (2022).

Considera-se o futuro da biomassa como fonte de energia promissor, principalmente em países em desenvolvimento, nos quais a geração de resíduos aproveitável é significativa. Nesse sentido, o biogás é um dos combustíveis mais comuns que tem sido gerado a partir do desperdício de alimentos. Este é um gás renovável que contém alta quantidade de metano (55-65%) e dióxido de carbono (30-45%) e menor quantidade de sulfeto de hidrogênio, amônia, hidrogênio e oxigênio. A combustibilidade do biogás é atribuída ao metano sob a presença de suprimento suficiente de oxigênio. No entanto, o biogás só é combustível quando o metano é superior a 45% no produtor. O metano é incolor, inodoro e queima com uma chama azul. Os resíduos alimentares podem ser convertidos em biogás por digestão anaeróbica com micróbios anaeróbios em tanque digestor anaeróbico (CHHANDAMA, 2022).

É composto principalmente de metano e dióxido de carbono, mas também contém vapor de água e vestígios de nitrogênio, sulfeto de hidrogênio e outros gases (CARUSO, 2019). A composição exata depende da fonte de biomassa e da tecnologia usada para produzir e/ou extrair o biogás. A energia no biogás vem do metano – sua combustão irá produzir calor e liberar gases não queimados e de combustão (por exemplo, H<sub>2</sub>, CO). O biogás tem entre 30 e 40% menos metano (v/v) do que o gás natural derivado de combustível fóssil e, portanto, um valor de aquecimento proporcionalmente mais baixo. No entanto, a concentração de metano no biogás produzido por algumas operações pode chegar a 70% (LABATUT; PRONTO, 2018).

El-Mashad e Zhang (2010) relataram que uma mistura de esterco de vacas leiteiras e resíduos de alimentos otimiza a produção de metano (60%) quando comparado à digestão de esterco ou resíduos de alimentos (EL-MASHAD; ZHANG, 2010). Ainda, o biogás otimizado (603 L CH<sub>4</sub> kg<sup>-1</sup> de ração volátil) foi produzido a partir de uma mistura de 70% de esterco de

gado, 20% de resíduos de alimentos e 10% de lodo de esgoto a uma temperatura de codigestão de 36 °C quando a taxa de carga orgânica era de 1,2 g de ração volátil L<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> (MARAÑÓN, 2012).

Em estudo realizado por Onthong e Juntarachat (2017), foi investigado o potencial de produção de biogás a partir de resíduo de soja cru e processado, casca de mamão, bagaço de cana-de-açúcar, palha de arroz e gengibre tailandês. O experimento foi realizado em cinco tempos de retenção hidráulica (TRH), variáveis a 30 °C, nas quais o resíduo de soja gerou o maior biogás (560,47 mL) aos 25 dias seguidos pelas cascas de mamão no TRH de 15 dias com rendimento de 404,24 mL. A taxa média de produção de biogás de resíduo de soja, casca de mamão, bagaço, palha e gengibre tailandês foi de 63,01, 54,63, 16,28, 13,94 e 0,68 L dia<sup>-1</sup>, respectivamente (ONTHONG; JUNTARACHAT, 2017).

### **3.5 Obtenção e aplicações do biofertilizante**

Os biofertilizantes são considerados uma melhor alternativa aos fertilizantes químicos em prol da proteção do meio ambiente e da saúde humana. Estes contêm células vivas de vários microrganismos, incluindo bactérias e cianobactérias, que cobrem a rizosfera ou o espaço interno da planta quando aplicados nas sementes, superfície da planta e/ou solo, promovendo assim o crescimento da planta pela conversão de nutrientes essenciais (principalmente nitrogênio e fósforo) de não absorvíveis para formas absorvíveis (ATAEI, 2022; YADAV; SARKAR, 2018).

A hidrólise química de resíduos de alimentos, especialmente digeridos e compostos derivados de resíduos de alimentos, é uma nova abordagem alternativa para a geração de um produto que pode ser usado como um biofertilizante (DU, 2018). Esse outro subproduto, obtido com baixo custo, pode ser percebido como insumo agrícola valioso, considerando as elevadas concentrações de macro e micronutrientes mineralizados ou parcialmente disponíveis, grande quantidade de matéria orgânica, substâncias húmicas, variedade de microrganismos benéficos e condições sanitárias satisfatórias. Todas essas propriedades apoiam melhorias na fertilidade do solo, com efeitos positivos sobre as estruturas pedológica, físico-química e biológica (LUKEHURST; FROST; AL, 2010; TEJADA, 2016).

De fato, a importância dos microrganismos nos biofertilizantes está na capacidade de produzir nitrogênio, potássio, fósforo e outros nutrientes requeridos pela planta (MAHMUD, 2021). Esses microrganismos podem ser aplicados de forma foliar semelhante aos fertilizantes químicos, ou também podem ser incorporados diretamente ao solo como inóculos, ou ainda podem ser utilizados como cobertura de sementes (ASADU, 2020).

Os biofertilizantes podem conter microrganismos que suportam o crescimento das plantas, aumentando o suprimento de nutrientes quando administrados a sementes, plantas

ou ao solo. Estes colonizam a rizosfera ou o interior das plantas. Tal processo envolve o uso de microrganismos promotores de crescimento que participam de uma variedade de atividades bióticas no ecossistema do solo, a fim de torná-lo dinâmico e sustentável para o desenvolvimento das culturas. Os biofertilizantes ainda são amplamente utilizados para acelerar as atividades microbianas que aumentam a disponibilidade de nutrientes que podem ser absorvidos facilmente. Ainda aumentam a fertilidade do solo, fixando  $N_2$  atmosférico e solubilizando fosfatos insolúveis no solo (DANIEL, 2022). Estima-se que o mercado cresça a uma taxa de crescimento anual composta (CAGR) de 14,0% de 2015 a 2020 e deverá atingir US\$ 1,88 bilhão até 2025. Devido às rígidas regulamentações sobre o uso de fertilizantes químicos, os biofertilizantes são os mais utilizados na Europa e na América Latina (RAJA, 2013).

Acerca das aplicações, Pereira de Paiva (2015) estudaram a preparação e a caracterização de biofertilizantes para uso em hidroponia utilizando resíduos agrícolas como aves, esterco bovino, bagaço de laranja e suas misturas. Os resíduos e misturas foram caracterizados quanto ao pH, condutividade elétrica, índice salino, ácido láctico, carbono orgânico total (COT), macro e micronutrientes e atividade de urease. Os biofertilizantes contendo dejetos de aves apresentaram os maiores valores de nutrientes com pH e condutividade elétrica. Os estercos de aves e bovinos apresentaram os melhores resultados em todos os atributos em relação aos demais (PEREIRA DE PAIVA, 2015).

O resíduo de pseudocaule de banana também foi considerado eficaz para produzir biofertilizante de potássio usando cinco bactérias diferentes *Bacillus circulans*, *B. subtilis*, *B. pumilus*, *Pseudomonas stutzeri* e *Serratia rubidaea*. Diferentes testes para verificar a eficácia do líquido fermentado no crescimento das plantas revelaram aumento no comprimento da parte aérea e da raiz, peso seco e fresco e teor de clorofila das plantas de feno-grego. O estudo também comprovou que as bactérias degradam a celulose presente no pseudocaule da bananeira e liberam o potássio ligado tornando-o adequado para a produção de biofertilizante potássico. (MAHALAKSHMI; NAVEENA, 2016).

Como, ao contrário dos fertilizantes químicos, estes são naturais, decomponíveis, orgânicos e econômicos, sua aplicação é fortemente recomendada. Em geral, pode-se reconhecer que os biofertilizantes são um componente importante do manejo integrado de nutrientes e são um instrumento robusto para proteger o meio ambiente e desenvolver uma agricultura sustentável (ATAEI, 2022).

## **4 MATERIAL E MÉTODOS**

### **4.1 Descrição do local de estudo**

A pesquisa foi realizada no anexo do Laboratório de Análises de Resíduos Agroindustriais (LARA), localizado no bloco H da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), campus Cascavel, Paraná.

O município de Cascavel situa-se geograficamente entre as coordenadas 24°57' 21"S de latitude e 53°27' 9" W de longitude. Segundo a classificação de Köppen-Geiger, o clima predominante do município é o Cfa, que corresponde ao Clima Subtropical Mesotérmico, que representa clima com verões quentes e geadas pouco frequentes, com maior incidência de chuvas no verão e não apresenta estação seca definida. A média de temperatura anual é de 20 °C e a pressão atmosférica média anual é de 936,34 hPa (IAPAR,2019).

### **4.2 Coleta e caracterização do inóculo e dos substratos**

Como diluente e inóculo, utilizou-se biofertilizante de um biodigestor anaeróbio, tipo lagoa coberta, de escala real, abastecido em sistema semicontínuo e recebe dejetos de vacas leiteiras (Figura 7), com agitação mecânica intermitente e separação de frações (sólido/líquido) anteriormente à sua inserção no biodigestor, proveniente de uma agroindústria de produção de leite, localizada no município de Céu Azul, Paraná (com 50,3 km de distância do local do experimento).

O biofertilizante foi utilizado como inóculo por ser um material rico em microrganismos anaeróbios e por ser um diluente no início do processo. Além de inocular microrganismos e substituir água limpa, o biofertilizante também foi uma estratégia adotada para fornecer alcalinidade no experimento.

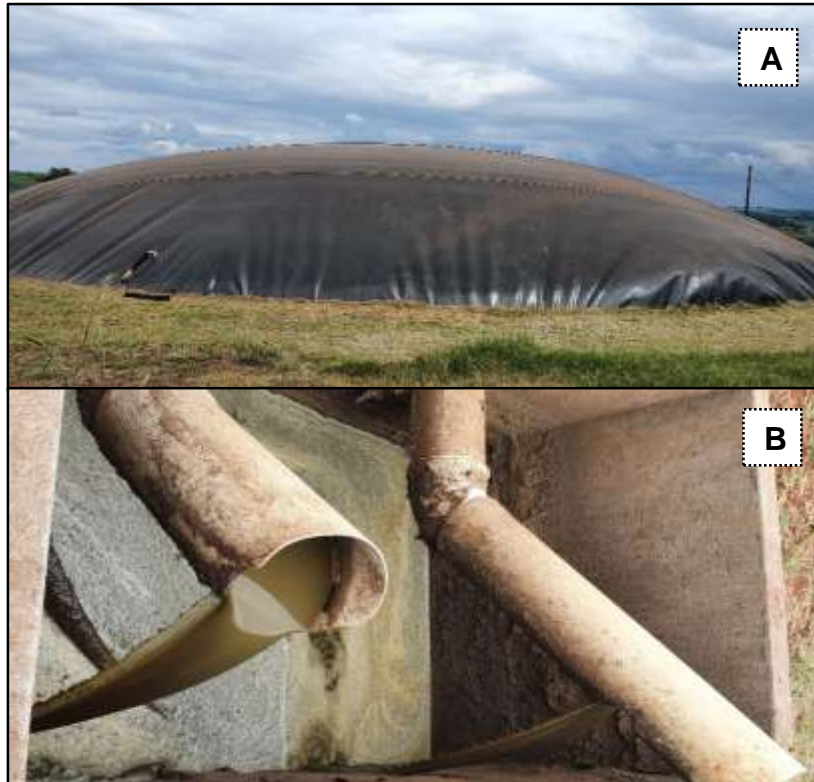


Figura 7 A: Biodigestor anaeróbio; B: Duto de saída do (inóculo) biofertilizante.

Como substrato foram utilizados resíduos de frutas e verduras (RFV) provenientes do Banco de Alimentos (coordenado pelo município em parceria com a Central de Abastecimento do Paraná S.A – CEASA) de Cascavel, PR. Os RFVs utilizados foram cinco tipos de frutas e cinco tipos de verduras, dentre os quais: banana, batata, beterraba, cebola, cenoura, chuchu, mamão, manga, melancia e tomate (Figura 8). Foi coletada uma quantidade dos refugos segregados para fins de descarte, dentre os quais estiverem danificados, em estágio de putrefação e que não estiverem nos padrões de comercialização, disponíveis no Banco de Alimento do CEASA e nos mercados de pequeno porte vizinhos da Universidade.

Os RFVs foram selecionados a partir de uma percepção do quanto estava vindo em maior quantidade para o Banco de Alimentos e que eram tidos como rejeitos, além de estar em quantidades maiores pela sazonalidade do período do ano. Para inserir os resíduos de frutas e verduras no reator, foi utilizado o método físico de trituração para facilitar a entrada no meio e a biodegradação no processo.



Figura 8 Resíduos de Frutas e Verduras (RFVs). a) banana, b) batata, c) beterraba, d) cebola, e) cenoura, f) chuchu, g) mamão, h) manga, i) melancia e j) tomate.

Outro substrato utilizado foi a água residuária da bovinocultura de leite (ARBL), proveniente da mesma unidade produtora de leite de onde foi coletado o inóculo; localizada no município de Céu Azul (PR).

A ARBL (Figura 9), composta pela urina, fezes, leite, pelos, água de lavagem, da chuva e dos bebedouros, foi coletada na caixa de passagem que antecede a entrada do biodigestor anaeróbio.



Figura 9 Água Residuária da Bovinocultura de Leite.

A caracterização físico-química dos substratos utilizados e da codigestão dos RFVs + ARBL no presente estudo é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 Caracterização físico-química dos RFVs, da ARBL e da CoDA

Parâmetros	Unidade	RFV	ARBL	CoDA
pH	upH	4,06±0,06	6,55±0,17	5,54±0,03
Condutividade Elétrica	mS cm <sup>-1</sup>	5,22±0,06	7,75±0,49	6,58±0,07
Umidade	%(MN)	87,57±0,22	97,39±0,50	94,63±0,07
Sólidos Totais	%(MN)	12,42±0,22	2,60±0,50	5,36±0,07
Sólidos Voláteis	% de ST	91,70±1,05	77,68±1,19	88,84±0,23
Sólidos Fixos	% de ST	8,29±1,05	22,31±1,19	11,15±0,23
Carbono Orgânico Total	% de ST	50,94±0,1	43,15±0,2	49,35±0,1

### 4.3 Ensaio semicontínuo

Para o experimento, foram utilizados três reatores de regime semicontínuo como câmara digestora e seis gasômetros para controle de biogás confeccionados em tubos de PVC, seguindo modelos existentes no Laboratório de Biodigestão Anaeróbia da UNESP – FCAVJ, cuja ilustração esquemática é apresentada na Figura 10. O volume de trabalho dos reatores foi de 60 litros. Cada reator representava um tratamento, totalizando três tratamentos com cinco repetições. Foram denominados T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> e T<sub>3</sub>, conforme a descrição da composição na Tabela 2.

Tabela 2 Composição dos tratamentos nos reatores semicontínuos

Tratamento	composição
T <sub>1</sub>	Monodigestão anaeróbia de RFV
T <sub>2</sub>	Codigestão anaeróbia de RFV + ARBL
T <sub>3</sub>	Monodigestão anaeróbia de ARBL

O experimento teve 109 dias de duração, iniciando em setembro de 2021 e finalizando em janeiro de 2022. Em termos de produção de gás foram contabilizados 52 dias e assumiu-se um tempo de retenção hidráulica (TRH) de 30 dias para todos os tratamentos, a partir do momento que as produções volumétricas diárias de biogás se estabilizaram, atingindo um coeficiente de variação inferior a 5%. A temperatura foi mantida em fase mesofílica (entre 30 e 40 graus Celsius), com auxílio de uma placa de aquecimento com resistores de níquel-cromo, conforme esquematiza a Figura 10 no item 13.



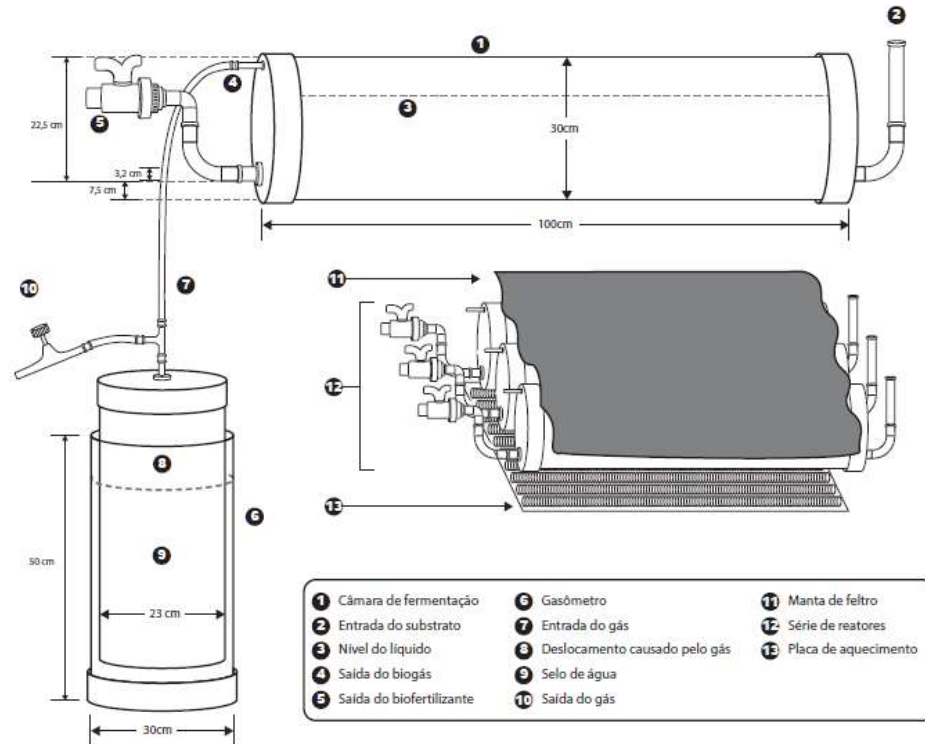


Figura 10 Desenho esquemático do reator modelo semicontínuo.

Os gasômetros foram confeccionados por dois tubos concêntricos de PVC, sendo o externo com diâmetro de 300 mm preenchido com água e o interno com 230 mm de diâmetro, submerso na solução selante com objetivo de mensurar os deslocamentos causados pelo biogás produzido na câmara digestora; na região externa do gasômetro foi fixada uma régua graduada para auxiliar na determinação dos deslocamentos provocados pelo biogás. Após aferição dos deslocamentos nas régua, o biogás foi descartado e esvaziado completamente dos gasômetros.

Dado o início do experimento, os sete primeiros dias, os três reatores foram abastecidos apenas com 60 litros de inóculo com intuito de aclimatar os microrganismos anaeróbios. Após esse período nos tratamentos T<sub>1</sub> e T<sub>2</sub> foram alimentados com progressões de cargas de sólidos totais nas seguintes proporções de resíduos de frutas e verduras (1, 1,5, 2, 2,5, 3, 3,5%) para 2 litros de alimentação diária. Para compor a carga do T<sub>1</sub>, além dos RFVs foi adicionado água e reciclo do processo totalizando 2.000 ml diárias de carga, sendo denominado de monodigestão dos resíduos de frutas e verduras. No reator do T<sub>2</sub>, foi adicionado os dois substratos (RFVs e a ARBL), caracterizado como codigestão anaeróbia. O tratamento T<sub>3</sub>, foi abastecido diariamente com 2 litros de água residuária da bovinocultura de leite (ARBL) até a sua estabilização, sendo denominado de monodigestão da ARBL. Definiu-se o volume diário de alimentação de 2 L para os três tratamentos.

A partir da estabilização da produção de biogás, foram coletadas amostras do gás (análises cromatográficas instantâneas – uma amostragem por semana) e do biofertilizante

(análises físico-químicas posteriores – três amostragens por semana) por um período de 30 dias (TRH). O volume de gás produzido durante o experimento foi padronizado nas condições normais de temperatura e pressão (CNTP).

#### 4.4 Métodos Analíticos

Para avaliar a performance do processo da monodigestão de resíduos de frutas e verduras (RFV), da monodigestão anaeróbia da água residuária da bovinocultura de leite (ARBL) e da codigestão anaeróbia com os dois substratos, foram analisados os seguintes parâmetros de monitoramento e controle do efluente do reator (biofertilizante): pH, condutividade elétrica (CE), alcalinidade (AI/AP e AV/AT), umidade, série de sólidos, carbono orgânico total (COT), nitrogênio total Kjeldahl (NTK), determinação de fósforo (P) e potássio (K), macronutrientes secundários (Ca e Mg) e micronutrientes (Fe, Zn, Cu e Mn).

O biogás é composto de hidrogênio ( $H_2$ ), metano ( $CH_4$ ), gás carbônico  $CO_2$  e outros gases e foi determinado por meio de um cromatógrafo de gás (modelo CG-2010, Shimadzu Scientific Instruments, Columbia, MD, EUA), equipado com um detector de condutividade térmica (GC/TCD), argônio utilizado como gás de arraste em coluna Carboxen® 1010 Plot (30 m, 0,53 mm). As temperaturas do injetor e do detector foram mantidas a 220 e 230 °C, respectivamente. A temperatura inicial da coluna foi de 130 °C e foi aquecida a 135 °C a uma taxa de 46 °C.min<sup>-1</sup> (PERNA et al., 2013). A calibração do cromatógrafo foi realizada com gás padrão de biogás contendo  $2 \pm 0,02\%$  de oxigênio,  $8 \pm 0,1\%$  de nitrogênio,  $55 \pm 1,0\%$  de metano e  $35 \pm 0,7\%$  de dióxido de carbono e gás padrão de hidrogênio.

As leituras de potencial hidrogeniônico (pH) e condutividade elétrica (CE) foram realizadas utilizando pHmêtro (TECNAL®, modelo TEC-3MP) e condutivímetro (MS Tecnopon®, modelo mCA 150), ambos de bancada. Os sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV) e sólidos fixos (SF) e o nitrogênio total Kjeldahl (NTK) foram determinados pelos métodos gravimétricos segundo a metodologia padronizada (APHA, 2012).

O carbono orgânico total (COT) foi obtido pela divisão da porcentagem de sólidos voláteis (SV) por 1,8, de acordo com a metodologia de Carmo e Silva (2012).

A alcalinidade parcial (AP), a alcalinidade intermediária (AI) e a acidez volátil (AV) foram determinadas pelo método de titulometria recomendado por Ripley, Boyle e Converse (1986). A relação AV/AT foi obtida pela operação matemática de divisão, e a AV pela soma das AP e AI, resultando na alcalinidade total (AT).

O fósforo total (P) e potássio total (K) foram obtidos pela digestão das amostras em solução nítrico-perclórica (3:1), o P foi detectado via absorvância, por meio de um espectrofotômetro UV-VIS Hach® e o K foi quantificado em fotômetro de chama, de acordo com Malavolta, Vitti e Oliveira (1997).

Para mensurar os macronutrientes secundários (Ca e Mg) e micronutrientes (Fe, Zn, Cu, Mn e Na) foi utilizado o extrato proveniente da digestão nítrico-perclórica, sendo a leitura realizada por meio de espectrômetro de absorção atômica (Shimadzu®, modelo AA-6300).

#### **4.5 Análises estatísticas**

Os resultados das variáveis apresentadas do experimento em ensaio semicontínuo foram avaliados mediante a Análise de Variância (ANOVA) e o teste de comparação de Tukey com 5% de significância.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Estratégias para partida dos reatores

Foram utilizadas duas estratégias para partida dos reatores neste experimento: o abastecimento inicial dos reatores totalmente com inóculo (biofertilizante proveniente da digestão anaeróbia da ARBL) e a progressão de carga em  $T_1$  e  $T_2$  (Figura 11). Estas estratégias são muito úteis quando se adicionam resíduos compostos por carboidratos lábeis como os RFV, pois a alcalinidade natural do biofertilizante proveniente da digestão anaeróbia da ARBL age amenizando os efeitos da hidrólise rápida dos RFV, além de ser um excelente inóculo (DAMACENO, 2019). Já a progressão de cargas evita a sobrecarga além da capacidade do sistema, enquanto o meio se adapta (LI, 2022).

Observa-se pela Figura 11 que o sistema respondeu de forma positiva às progressões de carga até os 3,5% de ST, ocasionando aumento da produção de biogás. A progressão de carga em faixas de 0,5%, assistida por parâmetros de monitoramentos como produção de volume de biogás, pH, alcalinidade, acidez volátil e relação AI/AP, permitiu acompanhar o comportamento dos reatores e estimar o aumento, que variou de 1% até 3,5% de ST, sem prejuízos à Digestão Anaeróbia.

A cada progressão de carga, a comunidade microbiana estabelecida adapta-se à nova condição do sistema, reiniciando as fases do crescimento lag, log e estacionária, com morte celular daqueles microrganismos mais fracos e sobrevivência dos mais resistentes. Assim, esse processo gradual de aumento de ST possibilitou a adaptação dos microrganismos, mas também uma seleção microbiana de elevada performance na conversão da matéria orgânica a biogás nas condições impostas (CHEN, 2022; ZHAN, 2022).

Além das estratégias de partida do reator, o  $T_1$  também foi conduzido com reciclo, ou seja, a reutilização do biofertilizante para compor as cargas diárias. O efeito do uso do reciclo potencializa os efeitos das estratégias anteriormente mencionadas, ou seja, age como inóculo e alcalinizante, dadas as características dos RFV. A eficiência do uso de reciclo também foi atestada por Damaceno (2019), Bofinger (2019) e Gomes (2022).

Desta forma, tanto a MonoDA RFV como a CoDA de RFV com ARBL com o uso das estratégias impostas são condições viáveis para o destino ambientalmente seguro dos RFV, além de gerar fonte renovável de energia (biogás) e nutrientes (biofertilizante). As condições impostas neste estudo (tratamentos) geraram resultados para a viabilização do processo de DA em ambos os cenários, tanto in loco (CEASA) com a MonoDA, como em propriedades rurais com a CoDA.

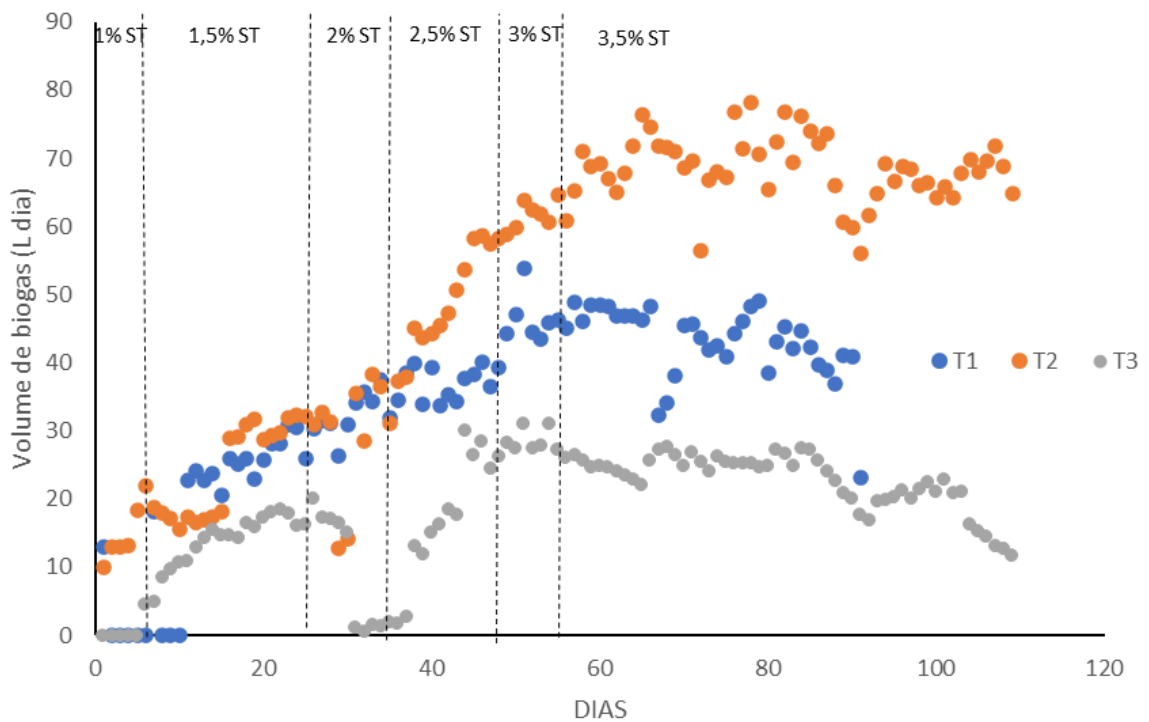


Figura 11 Volume de produção de biogás (L.d-1) referente à progressão de carga de ST (%). T1: MonoDA RFV; T2: CoDA RFV e ARBL; T3: MonoDA ARBL.

## 5.2 Produção específica de biogás e metano

Os resultados de recuperação energética dos RFV quando em mono ou codigestão com ARBL podem ser observados na Tabela 3. Considerando os valores de produção específica por kg de SV adicionados, observa-se que a CoDA dos RFV com ARBL proporciona um incremento de 11,3% na quantidade de biogás e 28,2% em metano. Da mesma forma, a CODA favorece a recuperação de energia em relação à MonoDA da ARBL (30,2% em biogás e 16,3% em metano).

Tabela 3 Produção específica de biogás da monodigestão e codigestão de RFV e ARBL

Tratamento	Produção Biogás (L kgST <sup>-1</sup> )	Produção Biogás (L kgSV <sup>-1</sup> )	Produção Metano (L kgST <sup>-1</sup> )	Produção Metano (L kgSV <sup>-1</sup> )	Metano (%)
MonoDA RFV	579 <sup>B</sup>	647 <sup>B</sup>	305 <sup>B</sup>	340 <sup>B</sup>	52,63±1,09
CoDA	639 <sup>A</sup>	720 <sup>A</sup>	387 <sup>A</sup>	436 <sup>A</sup>	60,58±0,61
MonoDA ARBL	429 <sup>C</sup>	553 <sup>C</sup>	291 <sup>C</sup>	375 <sup>C</sup>	67,83±1,13
CV (%)	9,53	9,89	9,88	10,34	

C.V.: coeficiente de variação; letras diferentes = médias estatisticamente diferentes a 95% de significância.

A maior recuperação de energia observada com a CoDA em comparação com ambas as MonoDAs pode ser explicada pela sinergia entre os resíduos.

A ARBL apresenta-se como um inóculo universal, uma vez que, no trato intestinal dos ruminantes, tem-se uma comunidade microbiana que favorece a metanogênese devido à presença de arqueias metanogênicas (MAGAÇO; DUARTE, 2018). Além disso, a presença de nitrogênio na ARBL auxilia no aumento da alcalinidade, favorecendo o equilíbrio do pH no meio reacional (BRES, 2018). Entretanto, a fração sólida da ARBL caracteriza-se principalmente pela presença de fibras, provenientes da dieta dos animais (silagem de planta inteira), material mais recalcitrante à degradação anaeróbia.

Os RFV, por outro lado, são uma fonte de biomassa cuja fração sólida apresenta carboidratos de fácil degradação (lábeis). Esta característica, entretanto, favorece a fase de hidrólise e disponibiliza altas concentrações de açúcares na fase inicial da DA. A presença de carboidratos de fácil degradação, por sua vez, favorece a formação de ácidos orgânicos de cadeias moleculares curtas a ponto de causar a redução de pH (SITORUS, 2013) devido à liberação de íons de hidrogênio ( $H^+$ ).

No entanto, a inserção da ARBL ao RFV suplementa a DA, dilui os resíduos para obtenção de um teor de sólidos compatível à tecnologia de reator de fluxo tubular, dilui compostos tóxicos e age com efeito de tamponamento (CHATTERJEE; MAZUNDER, 2020).

Compostos nitrogenados como aminas e íons de amônio ( $NH_4^+$ ), provenientes da degradação de proteínas, possibilitam esta capacidade tampão, pois ao reagir com  $CO_2$  e  $H_2O$  capturam os íons de hidrogênio em excesso no meio, fornecendo alcalinidade a partir da formação de carbonato de amônio ( $(NH_4)_2CO_3$ ) (MENG, 2018), reestabelecendo o equilíbrio entre as fases acetogênica e metanogênica.

### **5.3 Remoção de material orgânico**

A Tabela 4 apresenta as eficiências de remoção de material orgânico na forma de sólidos totais, sólidos voláteis e carbono orgânico total. O  $T_1$  apresentou as maiores remoções de sólidos totais, sólidos voláteis e carbono orgânico total.

Tabela 4 Caracterização dos efluentes e afluentes e teores de remoção do material orgânico dos tratamentos

Parâmetros	Material	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>
ST (%)	A	3,83±0,25	5,38±0,07	2,61±0,51
	E	0,63±0,05	1,08±0,12	0,96±0,11
Redução (%)		83,6 <sup>A</sup>	79,9 <sup>B</sup>	63,7 <sup>C</sup>
CV (%)		4,69		
SV (%)	A	89,54±2,47	88,71±0,41	77,69±1,20
	E	52,81±6,36	45,22±3,10	45,4±4,15
Redução (%)		91,3 <sup>A</sup>	87,6 <sup>B</sup>	74,4 <sup>C</sup>
CV (%)		3,36		
COT (%)	A	49,75±1,37	49,28±0,23	43,16±0,67
	E	29,34±3,54	25,12±1,72	25,22±2,31
Redução (%)		95,0 <sup>A</sup>	93,7 <sup>A</sup>	62,1 <sup>B</sup>
CV (%)		3,97		

Letras maiúsculas, na linha, comparam resultados de cada parâmetro entre os tratamentos. Médias seguidas de letras distintas diferem entre si, pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

Normalmente os resultados de remoção de material orgânico estão diretamente relacionados aos potenciais de produção de biogás/metano, uma vez que principalmente os SV são basicamente compostos por carbono.

Ao observar os resultados de produção de biogás e metano (Tabela 3), entretanto, nota-se que não há correlação destes com a eficiência de remoção de material orgânico, uma vez que a produção de energia seguiu a ordem  $T_2 > T_1 > T_3$ .

Uma hipótese para a maior eficiência de remoção de material orgânico em T<sub>1</sub> e não em T<sub>2</sub>, que apresentou maior produção de biogás, está na característica da fração sólida dos dois tratamentos. O T<sub>1</sub> apresenta fração sólida composta por cascas, sementes e polpa, enquanto em T<sub>2</sub>, além das cascas, sementes e polpas, há a contribuição da fração sólida da ARBL, composta principalmente por fibras. Assim, o comportamento das distintas frações sólidas no reator tubular horizontal pode ter favorecido à sedimentação das cascas, sementes e polpas, causando maior eficiência de redução dos materiais orgânicos e não necessariamente transformando-os em energia em forma de biogás.

Costa et al. (2016), ao analisarem os resultados de redução de sólidos voláteis, comentam sobre a tendência à segregação da fração sólida contida nas amostras dentro do reator. Na saída do efluente, como não há possibilidade de homogeneização dentro do reator, pode ocorrer imprecisão na amostragem, principalmente no que diz respeito à deposição de sólidos no fundo do digestor, que, por sua vez, pode superestimar os valores de redução.

#### 5.4 Estabilidade do processo

Os dados apresentados na Tabela 5 revelaram que os RFVs em monodigestão (T<sub>1</sub>) apresentaram um baixo valor de alcalinidade total e alto valor de acidez volátil, se comparado

à monodigestão de ARBL (T<sub>3</sub>) e à codigestão entre RFVs e ARBL. Estes resultados implicaram em um valor da relação AV/AT estatisticamente maior do que os apresentados por T<sub>2</sub> e T<sub>3</sub>. A relação AV/AT indica a capacidade de tamponamento do sistema e, segundo Wellinger et al. (2013), uma relação AV/AT > 0,3 – 0,4 indica que o processo está instável.

Tabela 5 Concentrações das alcalinidades

Tratamentos	Alcalinidade total (mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> )	Acidez volátil (mg L <sup>-1</sup> )	Relação AV/AT	Relação AI/AP	pH
T1	2619 ± 510b	1187 ± 327a	0,47 ± 0,2a	1,06 ± 0,5a	8,1 ± 0,2b
T2	9149 ± 2078a	197 ± 48b	0,02 ± 0b	0,05 ± 0b	8,7 ± 0,3a
T3	9762 ± 2099b	178 ± 24b	0,02 ± 0b	0,05 ± 0b	8,7 ± 0,2a
CV (%)	26,96	41,13	61,35	88,26	2,92

Segundo Deublein e Steinhauser (2010), o acúmulo de ácidos voláteis produzidos durante a digestão anaeróbia tende a reduzir o pH do meio reacional, como pode ser observado em T<sub>1</sub>, o qual apresentou valor estatisticamente menor do que T<sub>2</sub> e T<sub>3</sub>.

O principal controle de pH em reatores anaeróbios é feito por meio do sistema de tampão do bicarbonato, ou seja, da alcalinidade presente no meio. Toumi (2015) relatam que os microrganismos presentes nos dejetos dos bovinos advindos de seu trato intestinal propiciaram esse efeito tampão, garantindo a estabilidade para a digestão anaeróbia. Os resultados apresentados na Tabela 5 mostram que a codigestão anaeróbia entre RFV e ARBL são uma boa alternativa para o tamponamento do sistema.

A relação AI/AP mostra a relação entre a produção de ácidos e o tamponamento no processo de DA: nesse parâmetro, o tratamento T<sub>1</sub> foi estatisticamente maior que T<sub>2</sub> e T<sub>3</sub>. De acordo com Lili (2011), uma relação AI/AP > 0,4 indica que o reator está em sobrecarga, e quando menor do que 0,3 o reator está em subcarga. Este resultado indica que a MonoDA de RFV faz com que o reator fique sobrecarregado, podendo entrar em colapso, ou seja, está instável. Quando a ARBL é adicionada aos RFV, o reator entra em um processo de subcarga, ficando subdimensionado, podendo ser adicionada uma maior quantidade de RFV até que o reator atingisse relação AI/AP entre 0,3 e 0,4, faixa considerada ideal por Lili (2011). Portanto, a concentração de RFV poderia ter sido superior a 3,5% de ST.

## 5.5 Recuperação dos nutrientes pelo biofertilizante

O Brasil é o quarto maior produtor de grãos e o maior exportador de carne bovina do mundo, atrás da China, Estados Unidos e Índia (EMBRAPA, 2021). Por outro lado, apresenta 85% de dependência de fertilizantes, sendo a Rússia a principal fornecedora. Em números, a



o Brasil importa da Rússia 23% do nitrogênio (ureia e nitrato de amônio), 28% do Cloreto de Potássio e 31% do fósforo (fosfato monoamônico – MAP).

Esse cenário tornou-se mais crítico com a guerra envolvendo a Rússia e a Ucrânia. Como estratégia para reduzir a dependência de importação de fertilizantes minerais, dando oportunidade aos fertilizantes orgânicos e organominerais, foi lançado, em março de 2022, o Plano Nacional de Fertilizantes, o PNF.

No Plano Nacional de Fertilizantes, na seção cadeias emergentes, é apresentado um panorama sobre o aproveitamento de subprodutos com potencial de uso agrícola como fertilizantes. Neste sentido, são discutidos pontos que envolvem desde a sustentabilidade ambiental que envolve a inserção de resíduos orgânicos na cadeia produtiva de fertilizantes (economia circular, agricultura de baixo carbono, avaliação de ciclo de vida), até o estabelecimento de políticas públicas de estímulo ao aproveitamento agrícola dos resíduos orgânicos (BRASIL, 2021).

Segundo a Associação Nacional para Difusão de Adubos, ANDA (2021), os nutrientes mais aplicados são: potássio (K) 38%, seguido de fósforo (P) 29% e nitrogênio (N) 29%. O valor agrônomo de um biofertilizante está diretamente ligado à sua composição química, ou seja, quanto maior a quantidade de macronutrientes primários e secundários, melhor será seu desempenho no solo.

Os teores de macro nutrientes primários (N, P, K) e secundários (Ca e Mg) encontrados na análise dos biofertilizantes obtidos pela MonoDA ou CoDA de RFV e ARBL, podem ser observadas na Tabela 6.

Tabela 6 Teores de macronutrientes primários e secundários no biofertilizante em cada situação estudada

Tratamento	N	P	K	Ca	Mg
g kg ST <sup>-1</sup>					
T1	48,92 <sup>A</sup> ±2,14	7,24 <sup>A</sup> ±1,98	91,62 <sup>A</sup> ±9,93	18,11 <sup>C</sup> ±6,58	11,10±1,32
T2	38,81 <sup>B</sup> ±0,88	4,67 <sup>B</sup> ±0,96	68,11 <sup>B</sup> ±12,15	54,53 <sup>B</sup> ±4,28	11,94±0,74
T3	31,08 <sup>C</sup> ±0,72	4,19 <sup>C</sup> ±0,50	55,66 <sup>C</sup> ±11,34	77,13 <sup>A</sup> ±4,70	12,55±1,12
CV (%)	8,54	24,20	15,57	10,58	9,18

Para os macronutrientes N, P e K, observa-se que a MonoDA de RFV apresentou concentrações estatisticamente maiores do que a CoDA entre RFV e a MonoDA da ARBL. Durante a MonoDA dos RFV foi necessário o reciclo do biofertilizante para manter a alcalinidade do processo. Foram reutilizados 40% do volume de biofertilizante a cada carga diária. Esta estratégia tanto favoreceu a DA dos RFV como potencializou o valor agrônomo do biofertilizante. Entretanto, no cenário da utilização da tecnológica de DA in loco, ou seja,

nas CEASAs, o efluente do biodigestor será lançado na rede de esgoto, caso a logística de uso agrícola seja inviável pela inexistência de locais apropriados em distância compatível. Neste sentido, o incremento em nutrientes pode ser um ponto negativo, sendo necessário, em função da legislação das companhias de saneamento, um pós-tratamento para retirada dos nutrientes em excesso.

Do ponto de vista do uso agrícola propriamente dito, a condição de CoDA é a mais favorável. Neste sentido, observa-se na Tabela 7 que este tratamento apresenta valores estatisticamente maiores que a MonoDA da ARBL – o que representa, ao produtor rural, ganho na questão de fertilizantes, quando se comparam a MonoDA e a CoDA.

Para o Nitrogênio, o incremento em relação à MonoDA foi de aproximadamente 25%, 11% para Fósforo e 22% para o Potássio.

Os resultados de literatura sobre a valorização agrônômica do biofertilizante comparando-se a MonoDA com a CoDA são escassos. A maioria comenta sobre a qualidade ambiental do biofertilizante (ASTALS, 2012; MOLINUEVO-SALCES, 2013; HUANG, 2016) com ênfase na concentração de íons solúveis de N, P e K, mas no sentido de realização de pós-tratamento para disposição ambientalmente segura deste (AKHIAR, 2017).

A valorização agrônômica do biofertilizante proveniente da CoDA em comparação à MonoDA, em função do incremento de nutrientes que esta proporciona, é evidenciado em Montoro (2019), que observaram aumento de 13,5% para 22,9% em N e de 5,8% para 8,3% para K com a inserção de batata-doce (30%) à ARBL.

Com relação à concentração de micronutrientes no biofertilizante, pode-se observar efeito das condições estabelecidas, à exceção dos teores de Cu (Tabela 7). Para os demais micronutrientes, a MonoDA de ARBL apresenta as maiores concentrações dos elementos.

Tabela 7 Teores de micronutrientes no biofertilizante em cada situação estudada

Tratamento	Fe	Zn	Cu	Mn	Na
	g kg ST <sup>-1</sup>				
T1	0,49 <sup>C</sup> ±0,17	0,45 <sup>C</sup> ±0,05	0,03±0,03	0,08 <sup>C</sup> ±0,03	12,97 <sup>B</sup> ±2,30
T2	0,79 <sup>B</sup> ±0,17	0,59 <sup>B</sup> ±0,11	0,03±0,01	0,13 <sup>B</sup> ±0,01	44,56 <sup>B</sup> ±7,03
T3	1,08 <sup>A</sup> ±0,16	0,69 <sup>A</sup> ±0,20	0,06±0,01	0,23 <sup>A</sup> ±0,02	122,02 <sup>A</sup> ±40,76
CV (%)	20,82	23,28	56,89	13,37	39,97

A composição química dos biofertilizantes está diretamente relacionada à composição da dieta dos animais, no caso de T<sub>3</sub>. Quando a este resíduo, acrescentaram-se os RFV, houve uma diluição da concentração dos micronutrientes, o que, em alguns casos, é uma estratégia interessante, como para o Na.

Valores elevados de sódio trazem prejuízos tanto para as propriedades físicas e químicas do solo, quanto para a nutrição da planta. O efeito do excesso de sais ocorre principalmente pela interação eletroquímica entre os sais e a argila.

O excesso de sódio no solo gera uma camada adensada que dificulta o crescimento, a respiração, a expansão radicular, além da absorção de água e a fixação de CO<sub>2</sub> pela planta (TÁVORA, 2001). Por isso, recomenda-se fazer uma análise de caracterização química do biofertilizante e realizar aplicações com intervalos de tempo adequados para que o efeito de salinização seja reduzido.

Cobre e zinco são considerados metais pesados e apresentam efeito acumulativo no solo, na água e no organismo dos seres vivos, o que justifica sua presença na caracterização dos biofertilizantes produzidos. O uso desses elementos, que estão presentes em fungicidas, biofertilizantes, esterco de animais, lodo de esgoto e lixo urbano, pode elevar suas concentrações e causar toxicidade ao solo (MARSOLA, 2004; OLIVEIRA; OLIVEIRA, 2011).

Segundo Moreira e Capelesso (2006), em uma análise de biofertilizante é possível encontrar nutrientes como: nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, zinco, molibdênio, ferro, manganês, cobre e outros mais. Esses nutrientes presentes no biofertilizantes em sua grande maioria estão na sua forma iônica, o que significa que a sua absorção via foliar ou solo ocorre de maneira mais rápida, trazendo resultados imediatos para a planta.

Para quantificar o valor agrônômico dos biofertilizantes obtidos nas condições estudadas, apresenta-se, na Tabela 8, a quantidade recuperada dos macronutrientes primários e secundários considerando 1000 kg de ST de cada tratamento.

Tabela 8 Quantidades (em kg) de adubos minerais recuperados no biofertilizante, a cada tonelada de sólidos totais

Tratamento	Sulfato de Amônio	Superfosfato Triplo	Cloreto de Potássio	Hidróxido de Cálcio	Hidróxido de Magnésio
T1	245	39,5	184,0	25,3	18,3
T2	194	25,5	136,8	76,3	19,8
T3	155	22,8	111,8	107,9	20,8

Os valores da Tabela 8 trazem novamente o cenário do uso da DA apenas com RFV como o maior potencial de uso agrícola do biofertilizante gerado. Esta informação pode ser útil não somente a produtores rurais que apresentam a criação de animais, mas a outros interessados no potencial de recuperação energética e de nutrientes provenientes dos RFV.

Na condição do tratamento  $T_3$ , em que apenas a ARBL é submetida ao processo de AD, tem-se o melhor material para correção da acidez do solo, dada a maior quantidade de Ca+Mg recuperada.

Considerando o elemento Nitrogênio como base para a recomendação de adubação para a cultura do milho ( $180 \text{ kg N ha}^{-1}$ ), a cada 1000 kg de ST submetidos à CoDA ( $T_2$ ) ou MonoDA ( $T_1$ ), será possível cultivar:  $T_1 = 0,27 \text{ ha}$ ;  $T_2 = 0,22 \text{ ha}$  e  $T_3 = 0,17 \text{ ha}$  de milho. Ainda, para se obter 1000 kg de ST são necessários  $T_1$ : 158730 L,  $T_2$ : 92592 L e  $T_3$ :104167 L de biofertilizante.

Assim, observa-se a importância da valorização do biofertilizante como insumo na produção agrícola, para um país extremamente dependente de fertilizantes.

## 6 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos neste experimento, este trabalho avaliou a produção de biogás de resíduos de frutas e verduras (RFV), a produção de biogás da água residuária da bovinocultura de leite (ARBL) e avaliou a alternativa de utilização do processo de codigestão anaeróbia destes dois resíduos.

Foi possível concluir-se que: Dentre os três tratamentos, no T<sub>2</sub>, na codigestão anaeróbia, pôde-se observar um aumento na produção de biogás em relação à monodigestão anaeróbia de resíduos de frutas e verduras e da água residuária. Estes resultados sugerem que a codigestão anaeróbia da ARBL com os RFVs constituem uma alternativa interessante de economias de processo, devido ao compartilhamento de instalações e gerenciamento facilitado de resíduos combinados, como, por exemplo, aumentar a produção de biogás.

## REFERÊNCIAS

ABITEC. **Perfil da Pecuária no Brasil 2020**, 2020.

AGÊNCIA DE NOTÍCIAS DO PARANÁ. **Agricultura**: Ceasa reaproveita 4,6 mil toneladas de alimentos por ano. Disponível em: <https://www.aen.pr.gov.br/modules/noticias/article.php?storyid=101357&tit=Ceasa-reaproveita-46-mil-toneladas-de-alimentos-por-ano>. Acesso em: 14 jul. 2021.

AKHIAR, A.; BATTIMELLI, A.; TORRIJOS, M.; CARRERE, H.; Comprehensive characterization of the liquid fraction of digestates from full-scale anaerobic co-digestion. **Waste Management**, v. 59, p. 118-128, 2017.

APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21 ed. Washington: American Water Works Association, 2005. 1368 p.

ASADU, C. O. Investigation of the influence of biofertilizer synthesized using microbial inoculums on the growth performance of two agricultural crops. **Biotechnology Reports**, v. 27, p. e00493, 2020.

ASTALS, S.; NOLLA-ARDEVOL, V.; MATA-ALVAREZ, J. Anaerobic co-digestion of pig manure and crude glycerol at mesophilic conditions: Biogas and digestate, **Bioresource Technology**, v. 110, p. 63-70, 2012.

ASTALS, S. Co-digestion of pig manure and glycerine: Experimental and modelling study. **Journal of Environmental Management**, v. 92, n. 4, p. 1091–1096, abr. 2011.

ATAEI, P. The promotion of biofertilizer application on farms: Farmers' intentional processes. **Environmental Technology & Innovation**, v. 28, p. 102722, nov. 2022.

BEN INTERATIVO. **Balanco Energético Nacional Interativo**. Disponível em: <http://shinyepe.brazilsouth.cloudapp.azure.com:3838/ben/>. Acesso em: 7 jul. 2022.

BOFINGER, J. **Digestão anaeróbia das frações da cama de frango. Dissertação. Mestrado em Engenharia Agrícola**. 2019. 45 f. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2019.

BRASIL. **LEI Nº 12.305, DE 2 DE AGOSTO DE 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos**. BrasilConstituição Federal,, 2010. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/12305.htm#:~:text=DISPOSIÇÕES PRELIMINARES-,Art.,final](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/12305.htm#:~:text=DISPOSIÇÕES PRELIMINARES-,Art.,final) ambientalmente adequada dos rejeitos. Acesso em: 7 jul. 2022.

BRES, P.; BEILY, M.E.; YOUNG B. J.; GASULLA, J.; BUTTI, M.; CRESPO, D.; CANDAL, R.; KOMILIS, D. Performance of semi-continuous anaerobic co-digestion of poultry manure with fruit and vegetable waste and analysis of digestate quality: A bench scale study. **Waste Management**, v.82, p.276-284, 2018.

CHATTERJEE, B.; MAZUMDER, D. New approach of characterizing fruit and vegetable waste (FVW) to ascertain its biological stabilization via two-stage anaerobic digestion (AD). **Biomass and Bioenergy**, v.139, 2020.

CHEN, L.; MENG, X.; ZHOU, G.; ZHOU, Z.; ZHENG, T.; BAI, Y.; YUAN, H.; HUHE, T. Effects of organic loading rates on the anaerobic co-digestion of fresh vinegar residue and pig manure: Focus on the performance and microbial communities. **Biochemical Engineering Journal**, v.183, p. 108441, 2022.

CARMO, D. L.; SILVA, C. A. Métodos de quantificação de carbono e matéria orgânica em resíduos orgânicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 4, p. 1211-1220, 2012.

CARUSO, M. C. Recent updates on the use of agro-food waste for biogas production. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 9, n. 6, 2019.

CATAPAN, A.; CATAPAN, D. C.; CATAPAN, E. A. Formas alternativas de geração de energia elétrica a partir do biogás: uma abordagem do custo de geração da energia. **Revista Online Custos e Agronegócio**, v. 7, n. 1, 2011.

CEASA/PR. **Relatório de desempenho do Banco de Alimentos CEASA/PR de Cascavel**, 2022.

CHEN, C. Challenges in biogas production from anaerobic membrane bioreactors. **Renewable Energy**, v. 98, p. 120–134, 2016.

CHERUBINI, E. Life cycle assessment of swine production in Brazil: a comparison of four manure management systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 87, n. C, p. 68-77, 2015.

CHHANDAMA, M. V. L. Valorisation of food waste to sustainable energy and other value-added products: A review. **Bioresource Technology Reports**, v. 17, n. January, p. 100945, 2022.

COSTA, M. S. S. M.; LUCAS JUNIOR, J. de.; MENDONÇA COSTA, L. A.; ORRICO, A. C. A. A highly concentrated diet increases biogas production and the agronomic value of young bull's manure. **Waste Management**, v. 48, p. 521-527, 2016.

COSTA, A. M. T. DE. **Codigestão anaeróbia de resíduos bovinos e suínos: caracterização química e produção de biofertilizante para uso em cultura de milho**. 2014. 157 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2014.

CRUZ, A. C.; PEREIRA, F. DOS S.; FIGUEIREDO, V. S. DE. **Fertilizantes organominerais de resíduos do agronegócio: avaliação do potencial econômico brasileiro**. Rio de Janeiro, 2017.

DAL BOSCO, T. C. **Compostagem e vermicompostagem de resíduos sólidos: resultados de pesquisas acadêmicas**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2017.

DAMACENO, F. M.; BULIGON, E. L.; RESTREPO, J. C. P. S.; CHIARELOTTO, M.; NIEDZIALKOSKI, R. S.; MENDONÇA COSTA, L. A.; LUCAS JUNIOR, J. de.; COSTA, M. S. S. M. Semi-continuous anaerobic co-digestion of flotation sludge from broiler chicken slaughter and sweet potato: Nutrients and energy recovery. **Science of The Total Environment**, v. 683, p. 773-781, 2019.

DANIEL, A. I. Biofertilizer: The Future of Food Security and Food Safety. **Microorganisms**, v. 10, n. 6, p. 1220, 2022.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from Waste and Renewable Resources: an introduction.** 2nd Edition, Wiley-VCH, Weinheim, 2010. <https://doi.org/10.1002/9783527632794>

DEUBELIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biorefineries – Industrial Biological Wastewater Artificial Photosynthesis Renewables - Based Beyond Oil and Gas**, 2008.

DU, C. Valorization of food waste into biofertiliser and its field application. **Journal of Cleaner Production**, v. 187, p. 273-284, 2018.

EL-MASHAD, H. M.; ZHANG, R. Biogas production from co-digestion of dairy manure and food waste. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 11, p. 4021-4028, 2010.

ESPOSITO, G. Anaerobic co-digestion of organic wastes. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 11, n. 4, p. 325-341, 2012.

FAO. **The State of Food and Agriculture 2019. Moving forward on food loss and waste reduction.** Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2019.

GOLDEMBERG, J. Energia e desenvolvimento. **Estudos Avançados**, v. 12, n. 33, p. 7-15, 1998.

HUANG, X.; YUN, S.; ZHU, J.; DU, T.; ZHANG, C.; LI, X. Mesophilic anaerobic co-digestion of aloe peel waste with dairy manure in the batch digester: Focusing on mixing ratios and digestate stability. **Bioresource Technology**, v.218, p. 62-68, 2016.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ - IAPAR. **Cartas climáticas do Paraná: Classificação climática.** 2018. Disponível em: <https://www.idrparana.pr.gov.br/Pagina/Atlas-Climatico>. Acesso em: 01 jul. 2022.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. DO. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato.** Embrapa Suínos e Aves. Concórdia, SC, 2019a.

KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. DO. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato.** Concórdia, SC: Sbera: Embrapa Suínos e Aves, 2019b.

LABATUT, R. A.; ANGENENT, L. T.; SCOTT, N. R. Biochemical methane potential and biodegradability of complex organic substrates. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 3, p. 2255-2264, 2011.

LABATUT, R. A.; PRONTO, J. L. **Sustainable waste-to-energy technologies: Anaerobic digestion.** [s.l.] Elsevier Inc., 2018.

LI, B.; XIA, Z.; GOU, M.; SUN, Z.; HUANG, Y.; JIAO, S.; DAI, W.; TANG, Y. Production of volatile fatty acid from fruit waste by anaerobic digestion at high organic loading rates: Performance and microbial community characteristics. **Bioresource Technology**, v. 346, 2022.

LILI, M.; BIRÓ, G.; SULLYOK, E.; PETIS, M.; BORBÉLY, J.; TAMÁS, J. Novel approach on the basis of FOS/TAC method. In: Risk Factors for Environment and Food Safety” & ”Natural Resources and Sustainable Development” & ”50 Years of Agriculture Researche in Oradea. **Anais...** 2011.



LUKEHURST, C. T.; FROST, P.; AL, T. Utilisation of Digestate as Biofertiliser. **IEA Bioenergy**, 2010.

MAGAÇO, F. dos S.; DUARTE, E. R. Interação microbiana e metanogênese em ruminantes – uma revisão. **Medicina Veterinária (UFRPE)**, v. 13, n. 1, p. 88-95, 2019.

MAHALAKSHMI, R.; NAVEENA, M. L. Usage of Banana Pseudostem Waste for the Production of Potassic Biofertilizer using Cellulolytic Bacteria. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, v. 5, n. 8, p. 336-349, 2016.

MAHMUD, A. A. Biofertilizers: A Nexus between soil fertility and crop productivity under abiotic stress. **Current Research in Environmental Sustainability**, v. 3, p. 100063, 2021.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.

MARAÑÓN, E. Co-digestion of cattle manure with food waste and sludge to increase biogas production. **Waste Management**, v. 32, n. 10, p. 1821-1825, 2012.

MARSOLA, T.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A Acumulação de cobre e zinco em tecidos do feijoeiro em relação com o extraído do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9 p. 92-98, 2005.

MATINC, C. Potencial de produção de biogás a partir da Co-digestão de dejetos da suinocultura e bovinocultura. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 8, n. 4, p. 154-161, 2017.

MATOS, N. C. DA S. Percepção de agricultura sustentável no município de Maringá, Paraná, Brasil. **Interações (Campo Grande)**, v. 22, n. 1, p. 243-262, 2021.

MENG, X.; YU, D.; WEI, Y.; ZHANG, Y.; ZHANG, Q.; WANG, Z.; LIU, J.; WANG, Y.; Endogenous ternary pH buffer system with ammonia-carbonates-VFAs in high solid anaerobic digestion of swine manure: An alternative for alleviating ammonia inhibition? **Process Biochemistry**, v. 69, p. 144-152, 2018.

MOLINUEVO-SALCES, B.; GÓMEZ, X.; MORÁN, A.; GARCÍA-GONZÁLEZ, M.C.; Anaerobic co-digestion of livestock and vegetable processing wastes: Fibre degradation and digestate stability. **Waste Management**. v. 33, p. 1332-1338, 2013.

MONTORO, S.B.; LUCAS JÚNIOR, J.de.; SANTOS, D.F.L.; COSTA, M.S.S.M. Anaerobic co-digestion of sweet potato and dairy cattle manure: a technical and economic evaluation for energy and biofertilizer production. **Journal of Cleaner Production**, v. 226, p. 1082-1091, 2019.

MORAES, L. M.; PAULA JÚNIOR, D. R. Avaliação da biodegradabilidade anaeróbia de resíduos da bovinocultura e da suinocultura. **Engenharia Agrícola**, v. 24, n. 2, p. 445-454, 2004.

NEGRI, C. Anaerobic digestion of food waste for bio-energy production in China and Southeast Asia: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 133, p. 110138, 2020.

ONTHONG, U.; JUNTARACHAT, N. Evaluation of Biogas Production Potential from Raw and Processed Agricultural Wastes. **Energy Procedia**, v. 138, p. 205-210, 2017.

ONYEAKA, H. N.; NWABOR, O. F. Valorization of natural industrial agrofood by-products. **Food Preservation and Safety of Natural Products**, p. 235-245, 2022.

PERNA, V.; CASTELLÓ, E.; WENZEL, J.; ZAMPOL, C.; FONTES LIMA, D. M.; BORZACCONI, L.; VARESCHE, M.B.; ZAIAT, M.; ETCHEBEHERE, C. Hydrogen production in an upflow anaerobic packed bed reactor used to treat cheese whey. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 38, p. 54-62, 2013.

PEREIRA DE PAIVA, E. Growth and efficiency of water use of papaya cultivars (*Carica papaya* L.) under doses of bovine biofertilizer in hydroponics cultivation. **African Journal of Agricultural Research**, v. 10, n. 22, p. 2315-2321, 2015.

RAJA, N. Biopesticides and Biofertilizers: Ecofriendly Sources for Sustainable Agriculture. **Journal of Fertilizers & Pesticides**, v. 4, n. 1, p. 1-2, 2013.

ROMANO, R. T.; ZHANG, R. Co-digestion of onion juice and wastewater sludge using an anaerobic mixed biofilm reactor. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 3, p. 631-637, fev. 2008.

SALES, J. C. F. DE. **Digestão Anaeróbia de Dejetos Suínos e Resíduos de Alimentos em Biodigestor Canadense**. 2017. 82f. (Dissertação de Mestrado Acadêmico), Programa de Pós-graduação em Sistemas Agroindustriais, Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar - Universidade Federal de Campina Grande, Pombal – Paraíba, 2017.

SANTOS, E. C. R. DOS.; RIBEIRO, J. L.; SOUZA, D. F.; NETO, M. G. **Avaliação de impactos ambientais causados pela criação de suínos**. IX Congresso de Ecologia do Brasil. **Anais...** São Lourenço – MG.: 2009

SHAFIEE-JOOD, M.; CAI, X. Reducing Food Loss and Waste to Enhance Food Security and Environmental Sustainability. **Environmental Science and Technology**, v. 50, n. 16, p. 8432-8443, 2016.

SITORUS, B.; SUKANDAR; PANJAITAN, S.D. Biogas Recovery from Anaerobic Digestion Process of Mixed Fruit -Vegetable Wastes. **Energy Procedia**, v. 32, p. 176-182, 2013.

TÁVORA, F. J. A. F. Crescimento e relações hídricas em plantas de goiabeira submetidas a estresse salino com NaCl. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 23, p. 441-446, 2001.

TEJADA, M. Use of biofertilizers obtained from sewage sludges on maize yield. **European Journal of Agronomy**, v. 78, p. 13-19, 2016.

TOUMI, J.; MILADI, B.; FARHAT, A.; NOUIRA, S.; HAMDY, M.; GTARI, M.; BOUALLAGUI, H. Microbial ecology overview during anaerobic codigestion of dairy wastewater and cattle manure and use in agriculture of obtained bio-fertilisers. **Bioresource Technology**, v.198, p. 141-149, 2015.

VIVAN, M. Eficiência da interação biodigestor e lagoas de estabilização na remoção de poluentes em dejetos de suínos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 3, p. 320-325, 2010.

WEGNER, R. C. Direito humano à alimentação: marco conceitual e legal para a presença do setor público brasileiro no abastecimento de frutas, legumes e verduras. **Segurança Alimentar e Nutricional**, v. 18, n. 1, p. 73, 2015.

WELLINGER, A.; MURPHY, J.; BAXTER, D. **The biogas handbook: Science, production and applications**. Cambridge, UK, 2013. 501 p.

YADAV, K. K.; SARKAR, S. Biofertilizers, Impact on Soil Fertility and Crop Productivity under Sustainable Agriculture Parthenium weed View project. **Environment and Ecology**, v. 37, n. November, p. 89-93, 2018.

ZHAN, Y.; CAO, X.; XIAO, Y.; WEI, X.; WU, S.; ZHU, J. Start-up of co-digestion of poultry litter and wheat straw in anaerobic sequencing batch reactor by gradually increasing organic loading rate: Methane production and microbial community analysis. **Bioresource Technology**, v. 354, 2022.