

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS**

**IRINA RAMIREZ MAS**

**INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DOS  
RESÍDUOS DA PRODUÇÃO DE CAFÉ**

**Poços de Caldas/MG**

**2021**

IRINA RAMIREZ MAS

INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DOS  
RESÍDUOS DA PRODUÇÃO DE CAFÉ

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de mestre em Ciência e Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Tratamento de efluente.

Orientador: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Renata Piacentini Rodriguez.

Poços de caldas/MG

2021

Dados internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas  
Biblioteca campus Poços de Caldas

M37i Mas, Irina Ramirez.  
Integração energética da produção de biogás a partir dos resíduos da produção de café. /  
Irina Ramirez Mas – Poços de Caldas / MG, 2021.  
64 f.-

Orientador: Renata Piacentini Rodriguez.  
Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) –  
Universidade Federal de Alfenas– Campus de Poços de Caldas, 2021.  
Bibliografia

1. Energia renovável. 2. Efluente de café. 3. Metano. I. Rodriguez, Renata Piacentini.  
II. Título.

CDD - 665.776

**"INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DOS RESÍDUOS DA PRODUÇÃO DE CAFÉ"**

A Banca examinadora abaixo-assinada aprova a Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Tratamento de Efluentes.

Aprovada em: 30 de setembro de 2021

Profa. Dra. Renata Piacentini Rodriguez  
Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Profa. Dra. Bruna de Souza Moraes  
Instituição: Universidade de Campinas

Profa. Dra. Giselle Patrícia Sancinetti  
Instituição: Universidade Federal de Alfenas



Documento assinado eletronicamente por **Renata Piacentini Rodriguez, Professor do Magistério Superior**, em 10/11/2021, às 08:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Giselle Patrícia Sancinetti, Professor do Magistério Superior**, em 10/11/2021, às 10:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Bruna de Souza Moraes, Usuário Externo**, em 10/11/2021, às 10:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unifal-mg.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unifal-mg.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0628579** e o código CRC **817AF0CB**.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço meus avós, minha mãe e pai por todo suporte e compreensão. Agradeço a professora Renata Piacentini Rodriguez pela orientação e apoio ao longo do mestrado, agradeço a Rafael e Lorena por todo apoio, compreensão, força e companheirismo na etapa de Laboratório e parte teórica do desenvolvimento da tese.

A Jurados professora Bruna, professora Giselle pelas frutíferas discussões e pelas excelentes aulas e explicações. Agradeço o corpo docente do programa Ciência e Engenharia Ambiental, por ter me aceitado no programa, por todo o apoio que me forneceu academicamente e pela excelência nas aulas.

Agradeço os meus amigos Juan, Lizandra, Daine, pela amizade de uma vida. Agradeço aos meus colegas de laboratório Leticia, Barbara por todo o apoio e parceria que me foi dado nos experimentos, discussões e aprendizados. Agradeço ao Laboratório de biotecnologia anaeróbia (BioTech) da Unifal-Poços de Caldas pela disponibilidade dos materiais. O presente trabalho foi realizado com apoio da coordenação de aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior – Brasil (CAPES) – código de financiamento 001.

## RESUMO

Este estudo determinou a produção de biogás a partir da digestão anaeróbia de mucilagem de café para avaliar o potencial bioquímico de produção metano com uma avaliação de proposta de cenários ambientais utilizando resíduos de produção de café (mucilagem e água de lavagem do processo), lodo de estação de tratamento aeróbio e soro de suíno. A proposição dos cenários foi baseada no levantamento de dados previamente disponíveis na literatura e em ensaios experimentais utilizando a mucilagem do café. A atividade metanogênica específica (AME) da mucilagem foi determinado em frascos de 500 mL e o volume de biogás produzido foi determinado pelo método do deslocamento de volume após lavagem em solução alcalina. A presença de nutrientes e o pH foram parâmetros de análise nas avaliações experimentais. Os resultados obtidos experimentalmente mostraram que o pH foi o parâmetro de maior influência na produção de biogás. A partir dos ensaios experimentais, foram propostos três cenários visando a integração da geração de energia a partir dos resíduos do café (cenário 1) com outros substratos da região, como o lodo aeróbio (cenário 2) e o soro de leite (cenário 2). A da mucilagem de café foi  $804\text{NmI}\text{CH}_4/\text{gSTV}$  quando o pH foi corrigido para 6,5. O PMB da água de lavagem do processamento de grãos de café foi estimado teoricamente pela relação de  $0,35\text{L CH}_4/\text{g DQO}$  removida, resultando em  $0.087\text{NLCH}_4/\text{gSTV}$ . As estimativas teóricas para os cenários mostraram potencial de aproveitamento energético: para o cenário base, composto somente por resíduos de café, resultou na produção de  $4.919,31\text{ m}^3\text{CH}_4$ , equivalente a  $145.657,15\text{ MJ}$  de energia térmica e  $16.188,28\text{ KWh}$  de energia elétrica por período de safra, podendo suprir etapas de secagem de café um 11% no tempo de produção de café. Para os cenários 1 e 2, os resultados mostraram o uso alternativo de resíduos na entressafra, porque a produção energética foi a mesma tanto para o lodo, quanto para o soro de leite, neste período poderia abastecer 31 vivendas no tempo de entressafra.

Palavras-chave: energia renovável; mucilagem de café; metano; cenários de café; efluente de café.

## ABSTRACT

This study determined biogas production from the anaerobic digestion of coffee mucilage to evaluate the biochemical methane production potential with an evaluation of proposed environmental scenarios using coffee production waste (mucilage and process wash water), aerobic treatment plant sludge, and swine whey. The proposition of the scenarios was based on the survey of data previously available in the literature and on experimental tests using coffee mucilage. The specific methanogenic activity (SMA) of mucilage was determined in 500 mL flasks and the volume of biogas produced was determined by the volume shift method after washing in alkaline solution. The presence of nutrients and pH were parameters of analysis in the experimental evaluations. The results obtained experimentally showed that pH was the parameter with the greatest influence on biogas production. From the experimental tests, three scenarios were proposed aiming at the integration of energy generation from coffee waste (scenario 1) with other substrates from the region, such as aerobic sludge (scenario 2) and whey (scenario 2). That of the coffee mucilage was 804NmlCH<sub>4</sub>/gSTV when the pH was corrected to 6.5. The PMB of the coffee bean processing wash water was estimated theoretically by the ratio of 0.35L CH<sub>4</sub>/g COD removed, resulting in 0.087NLCH<sub>4</sub>/gSTV. The theoretical estimates for the scenarios showed potential for energy utilization: for the base scenario, composed of coffee waste only, resulted in the production of 4,919.31 m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>, equivalent to 145.657,15 MJ of thermal energy and 16,188.28 KWh of electrical energy per harvest period, and could supply coffee drying stages a 11% in coffee production time. For scenarios 1 and 2, the results showed the alternative use of waste in the off-season, because the energy production was the same for both sludge and whey, in this period it could supply 31 households in the off-season time.

Keywords: renewable energy; coffee mucilage; methane; coffee scenarios; coffee effluent.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de beneficiamento por via úmida .....	17
Figura 2 - Partes do conteúdo do grão de café .....	18
Figura 3 - Obtenção do café verde.....	19
Figura 4 - Localização da área de estudo em Google Earth: Fazenda Santa Alina ..	29
Figura 5 - Montagem experimental para medição do metano produzido por deslocamento volumétrico.....	31
Figura 6 - Sistema da proposta cenários no período da safra/entressafra do processamento de café. ....	38
Figura 7 - Curva de produção de metano sem correção de pH/sem adição de nutrientes.....	42
Figura 8 - Curva de produção de metano com correção de pH/sem adição de nutrientes.....	43
Figura 9 - Curva de produção de metano sem correção de pH/com adição de nutrientes.....	44
Figura 10 - Curva de produção de metano com correção de pH/com adição de nutrientes.....	45

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química dos microrganismos metanogênicos.....	23
Tabela 2 - Procedimento experimental dos testes AME.....	32
Tabela 3 - Composição da solução de nutrientes.....	32
Tabela 4 - Composição da solução de metais traços.....	33
Tabela 5 - Cenários propostos para avaliação do potencial energético do biogás ....	35
Tabela 6 - Parâmetros utilizados na proposição e avaliação dos cenários.....	37
Tabela 7 - Caracterização da mucilagem de grão de café de lavagem dos grãos obtidos na Fazenda Santa Alina.....	39
Tabela 8 - Avaliação de nutrientes da mucilagem de grãos de café e água de lavagem dos grãos obtidas na Fazenda Santa Alina.....	40
Tabela 9 - Resultados dos ensaios de atividade metanogênica específica com a mucilagem dos grãos de café.....	41
Tabela 10 - Resultados dos parâmetros da equação modificada de Gompertz para os tratamentos: (1), (2), (3) e (4).....	46
Tabela 11 - Resultados do experimento sem mucilagem (As barras de erro referem-se ao desvio padrão das triplicatas).....	47
Tabela 12 - Dados da entrada de tanque de alimentação no período da safra.....	48
Tabela 13 - Dimensão do reator para período safra/entressafra.....	49
Tabela 14 - Quantidade de metano no período na safra.....	49
Tabela 15 - Parâmetros mantidos para o período de entressafra.....	50
Tabela 16 - Dados da entrada de tanque de alimentação para o cenário 1 .....	50
Tabela 17 - Dados da entrada de tanque de alimentação para o cenário 2 .....	51
Tabela 18 - Quantidade e metano produzido para o cenário 1 e cenário 2 .....	51
Tabela 19 - Síntese de resultado teóricos energéticos para três cenários projetado	53
Tabela 20 - Dados da energia térmica por safra do processamento de café.....	54
Tabela 21 - Resultado da substituição por cada período de processamento de café	54

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AME	Atividade metanogênica específica
ANP	Agencia Nacional do Petróleo, Gás natural e Biocombustíveis
CB	cenário base
C1	cenário 1
C2	cenário 2
CNTP	Condições normais de temperatura e pressão
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
DA	Digestão anaeróbica
DB-SOFC	Direct Biogas Solid Oxide Fuel Cell
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GPL	Gás de petróleo Liquefeito
NPK	Fertilizante que contem Nitrogênio, Fósforo e Potássio
OIC	Organização Internacional do café
PBM	Potencial Bioquímico de metano
PBTM	Potencial Bioquímico teórico de metano
PCI	Poder calorífico inferior
Rpm	Revoluções por minuto
SST	Sólidos Solúveis Totais
ST	Sólidos Totais
SV	Sólidos Voláteis
SVT	Sólidos Voláteis Totais
USDA	United States Department of Agriculture

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Lambda$	Duração da fase lag
$\text{CO}_2$	Dióxido de carbono
$\text{CH}_4$	Metano
$\text{CH}_4\text{g-SVT}$	Metano por grama de sólidos voláteis totais $\text{CH}_4\text{g-SVT}$
$\text{CO}_2$	Dióxido de carbono
cps/kg	Café Pergaminho seco/quilograma
$\text{DQO}_i$	Demanda de oxigênio inicial
$\text{DQO}_f$	Demanda de oxigênio final
$e$	Número de Euler
EE	Energia elétrica gerada
$\text{ET}_{\text{Biogás}}$	Energia Térmica do Biogás
$\text{gO}_2/\text{L}$	Gramas de Oxigênio/litro
$\text{gO}_2\text{L}^{-1}$	Gramas de oxigênio/litro
$\text{gSVT}/\text{L}$	Gramas de Sólidos Voláteis Totais
$\text{gST} /\text{L}$	Gramas de sólidos totais/litro
há	Hectare
$\text{H}_2$	Hidrogênio molecular
HAc	Miligrama de ácidos voláteis/litro
$\text{kWh}/\text{kgST}$	Quilowatt hora/quilograma de sólidos totais
$\text{kWh}/\text{mês}$	Quilowatt hora/mês
$\text{kWh}/\text{m}^3$	Quilowatt hora/metro cúbico
MCI	Rendimento de operação do motor
L	Litro
ml	Mililitro
$\text{mgCaCO}_3\text{l}^{-1}$	Miligrama de carbonato de Cálcio/ litro
$(\text{mgCaCO}_3/\text{L})_i$	Miligramas de Carbonato de Cálcio inicial
$(\text{mgCaCO}_3/\text{L})_f$	Miligramas de Carbonato de Cálcio final
$(\text{mg HAc}/\text{L})_i$	Miligramas de ácidos voláteis/litro inicial
$(\text{mg HAc}/\text{L})_f$	Miligramas de ácidos voláteis/litro final
$\text{mg}/\text{L}$	Miligramas/litro
$\text{mgO}_2/\text{L}$	Miligramas de Oxigênio/litro
MJ	Mega Joule

MJ/kg	Mega Joule/quilograma
MJ/kgcps	Mega Joule/quilograma de café pergaminho seco
MJ/m <sup>3</sup>	Mega Joule/metro cúbico
m <sup>3</sup> /d	Metro cúbico/dia
m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub>	Volume de metano em metro cúbico
mLCH <sub>4</sub> /gSV	Volume de metano (em mL) por grama de sólidos voláteis
NaOH	Hidróxido de Sódio
NLCH <sub>4</sub>	Volume de metano (L) nas condições normais (N) de temperatura e pressão
NmLCH <sub>4</sub>	Volume de metano (ml) nas condições normais (N) de temperatura e pressão
NLCH <sub>4</sub> /gSTV	Volume de metano (L) nas condições normais (N) / grama de STV
NLCH <sub>4</sub> /gDQO	Volume de metano (L) nas condições normais (N) /grama de DQO
N <sub>2</sub>	Nitrogênio molecular
pH	Potencial de Hidrogênio
pH <sub>i</sub>	Potencial de Hidrogênio inicial
pH <sub>f</sub>	Potencial de Hidrogênio final
pK <sub>1</sub>	Cologaritmo da constante de ionização
PCH <sub>4(t)</sub>	Produção cumulativa de metano (NmLCH <sub>4</sub> )
P <sub>max</sub>	Potencial de produção de metano (NmLCH <sub>4</sub> )
PCI <sub>CH<sub>4</sub></sub>	Poder Calorífico inferior de metano
R <sub>max</sub>	Taxa de produção máxima de metano (NmLCH <sub>4</sub> /dia)
STV/L	Sólidos totais voláteis por litro
Sacas/há	Sacas por hectárea
Tn	Toneladas
V <sub>CH<sub>4</sub></sub>	Volume de Metano
v/v	Relação volume/volume
w/w ST	Relação peso/peso de sólidos totais
wSV/wST	Relação peso/peso de sólidos voláteis e sólidos totais

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1	OBJETIVOS.....	14
1.1.1	<b>Objetivo Geral.....</b>	<b>14</b>
1.1.2	<b>Objetivos Específicos.....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>16</b>
2.1	PRODUÇÃO DE CAFÉ.....	16
2.2	PROCESSAMENTO.....	16
2.3	SUBPRODUTOS POLUENTES DA PRODUÇÃO DE CAFÉ.....	19
2.4	DIGESTÃO ANAERÓBIA.....	21
2.4.1	<b>Conceito.....</b>	<b>21</b>
2.4.2	<b>Requisitos ambientais do processo biológico.....</b>	<b>22</b>
2.5	POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE METANO E SUA CONVERSÃO ENERGÉTICA.....	23
2.5.1	<b>Metano.....</b>	<b>23</b>
2.5.2	<b>Atividade metanogênica específica (AME).....</b>	<b>24</b>
2.5.3	<b>Potencial bioquímico teórico de metano (PBTM) e conversão em energia.....</b>	<b>25</b>
2.6	UTILIZAÇÃO DA CO-DIGESTÃO PARA AUMENTO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS.....	26
2.7	USOS E APLICAÇÕES DO BIOGÁS.....	27
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>31</b>
3.1	ÁREA DE ESTUDO – FAZENDO PRODUTORA DE CAFÉ.....	29
3.2	ETAPA 1: ENSAIOS EXPERIMENTAIS PARA PRODUÇÃO DE METANO.	30
3.2.1	<b>Coleta e caracterização da mucilagem de café.....</b>	<b>30</b>
3.2.2	<b>Inóculo.....</b>	<b>30</b>
3.2.3	<b>Procedimento operacional dos ensaios de AME.....</b>	<b>30</b>
3.2.4	<b>Análises físico – químicas.....</b>	<b>33</b>
3.2.5	<b>Tratamentos de dados.....</b>	<b>33</b>
3.3	ETAPA 2: PROPOSIÇÃO DE CENÁRIOS PARA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO E AMBIENTAL DA DIGESTÃO ANAERÓBIA.	34

3.3.1	Cenário Base.....	35
3.3.2	Cenário 1.....	35
3.3.3	Cenário 2.....	35
3.3.4	Dados utilizados na proposição e avaliação dos cenários.....	36
4	<b>RESULTADOS E DISCUSÃO.....</b>	<b>39</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DO PROCESSAMENTO DOS GRÃOS DE CAFÉ DA FAZENDA SANTA ALINA.....	39
4.2	POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE METANO A PARTIR DA MUCILAGEM DE CAFÉ.....	40
4.3	SÍNTESE DE RESULTADOS TEÓRICOS DO CENÁRIO BASE – PERÍODO SAFRA.....	48
4.4	SÍNTESE DE RESULTADOS TEÓRICOS DO CENÁRIO 1 E CENÁRIO 2 – PERÍODO ENTRESSAFRA.....	49
4.5	POTENCIAL ENERGÉTICO DA DIGESTÃO ANAERÓBIA DOS TRÊS CENÁRIOS.....	52
4.6	SUBSTITUIÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO EM ETAPAS E ATIVIDADES DO PROCESSAMENTO DE CAFÉ.....	53
5	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>56</b>
	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>57</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O café é uma das bebidas mais consumidas no mundo e, neste contexto, segundo dados do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, a produção global de café em 2020/2021 está estimada em mais de 7,0 milhões de sacas (HALSTEAD, 2019). O Brasil se destaca como um dos países com maior produção, tendo atingido a marca de 51,4 milhões de sacas no ano de 2016, a maior da história do país (CONAB, 2019). Apesar dos benefícios econômicos, o cultivo e o processamento do café são acompanhados de desvantagens ambientais, como a elevada quantidade de resíduos (sólidos e líquidos) oriunda deste processo (CHEN; WEN; JIANG; LEI; LI; LI, 2019).

A medida que a produção aumenta, nas tradicionais fábricas de processamento do café, surgem problemas relacionados a ausência de instalações de tratamento eficientes, que resultam em descartes inadequados de um efluente com elevado conteúdo orgânico que pode ocasionar degradação dos corpos d'água, com alterações do ecossistema e sérias consequências para a saúde humana (DADI; MENGISTIE; TEREFE; GETAHUN; HADDIS; BIRKE; BEYENE; LUIS; BRUGGEN, 2018), bem como, das propriedades físico químicas do solo e das propriedades biológicas da biota microbiana e microfauna cultivável (KULANDAIVELU; BHAT, 2012). Em função do alto conteúdo de matéria orgânica dos resíduos de café, uma das alternativas para gestão e tratamento de águas residuárias do processamento do café é o aproveitamento de seus subprodutos finais na forma de biogás por meio de processos anaeróbios (LUZ *et al.*, 2017; NOVITA, 2016).

Nas últimas décadas, o Brasil é foco da atenção pelos serviços energéticos que provém em suas cidades, além disso tem uma quantidade considerável de biomassa disponível para aproveitar seu potencial energético. Atualmente, pouco são os estudos focados no tratamento de resíduos oriundos de café, embora as pesquisas anteriores mostraram que o biogás produzido a partir dos resíduos da produção de café podem ser uma excelente opção por contribuir com reduções na emissão de gases de efeito de estufa (SANTOS; ADARME; BAÊTA; GURGEL; AQUINO, 2018). Desta forma, o biogás pode ser aproveitado pode ser aproveitado em energia elétrica ou térmica, além de contribuir aos desafios dos objetivos de desenvolvimento econômico do país (ANP, 2017).

Pin, Barros, Lora, Olmo, Santos, Ribeiro e Rocha (2020). analisaram a produção de biogás a partir de água residuárias de café no Brasil utilizando biodigestores anaeróbios (), sendo que a produção máxima de metano foi de 11,4% acima da quantidade teórica de metano esperada para aquele resíduo (PIN; BARROS; LORA; OLMO; SANTOS; RIBEIRO; ROCHA, 2020). O pré-tratamento dos subprodutos do café com solução alcalina demonstrou ser eficiente na hidrólise da lignina e celulose, e permitiu uma produção de biogás de cerca de 18 NL CH<sub>4</sub>/L resíduo com um teor de metano de quase 80% v/v(BATTISTA; FINO; MANCINI, 2016).

O tratamento dos efluentes de café por meio do processo anaeróbio pode ser bastante promissor e eficiente na remoção de matéria orgânica, entretanto, pouco ainda foi explorado em relação ao potencial energético deste efluente, assim como o potencial de integração do processo anaeróbio em uma agroindústria de café. Este trabalho, propõe avaliar o potencial energético da produção de biogás a partir dos resíduos mucilagem e água de lavagem do processamento dos grãos de café em um cenário de integração deste efluente no escopo da agropecuária.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Determinar o potencial energético da produção de biogás a partir dos resíduos oriundos do processamento de café por meio do delineamento de cenários voltados a autossuficiência energética da produção de grãos de café e integração da produção de café com outros subprodutos da cadeia agroindustrial.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- a) Obter e caracterizar os resíduos oriundos da produção de café: mucilagem de café, obtido do interior do fruto e as águas residuárias geradas durante a lavagem e despulpamento do grão;
- b) Determinar experimentalmente a atividade metanogênica específica (AME) a partir da mucilagem dos grãos de café;
- c) Determinar o potencial bioquímico teórico de metano a partir da água residuária da lavagem dos grãos de café;

- d) Delinear cenários para avaliação energética do uso do biogás como substituto energético no processamento dos grãos de café e redução das emissões de gases de efeito estufa;
- e) Avaliar a substituição energética dos resíduos da produção de café em dois cenários distintos: (i) com lodo oriundo de estação de tratamento esgoto e, (ii) utilizando soro de leite como proposta de integração agroindustrial a manutenção da produção de biogás no período entressafra.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 PRODUÇÃO DE CAFÉ

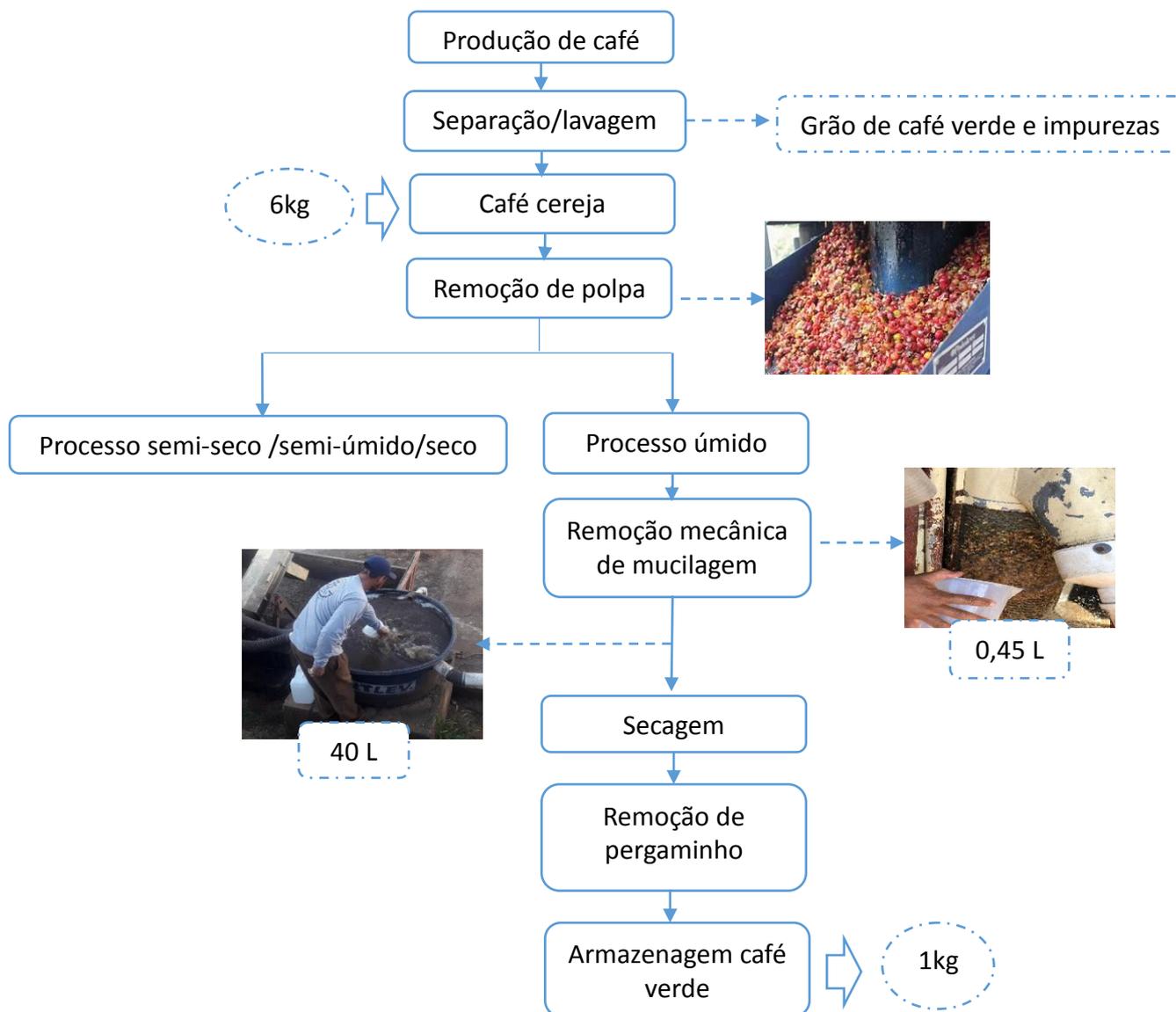
O Brasil é maior produtor e exportador de café com uma participação de 30 a 40% do mercado mundial e segundo maior consumidor da bebida no mundo. A maioria dos produtores de café está distribuído no estado de Minas Gerais, com cerca de 50% da produção nacional e um dos principais produtores de cafés especiais do país. São Paulo, Espírito Santo e Bahia contribuem com uma área de 2 milhões de hectares e cerca de 300 mil produtores. Atualmente, o tipo predominante é o café da espécie arábica, concentrado no estado de Minas Gerais, seguido por São Paulo, Espírito Santo e Bahia. Os quatros estados concentram 85% da produção nacional dessa espécie (*Coffea arábica* L.) (CONAB, 2019).

Em 2017, as exportações de café foram de 30,9 milhões de sacas e a receita de US\$5,24 bilhões, ocupando a quinta posição entre os produtos mais exportados pelo agronegócio brasileiro. De 2012 a 2014, as exportações do complexo café-verde, solúvel, terrado e moído foram de 200 milhões de sacas, trazendo US \$35 bilhões de divisas para o país, demonstrando que o café é atividade que se destaca na economia do país, além de ser uma importante fonte de alimentos de qualidade para o mercado interno, solidificando as estratégias de segurança alimentar do país (CAFEICULTURA, 2016).

### 2.2 PROCESSAMENTO

Depois da colheita (Figura 1), os grãos devem ser preparados para serem levados a fábrica de café. Primeiramente, é feita a lavagem e separação dos grãos para eliminação das impurezas típicas da roça: folhas, torrões, pedaços de pau, terra e pedrinhas. Os melhores grãos de cafés são aqueles que boiam na água, enquanto os frutos verdes, não indicados para a produção, afundam e são descartados. Com a adoção do lavador ou separador hidráulico, os grãos maduros (mais leves), em função da densidade, flutuam e são separados dos frutos pesados (parcialmente maduros -verdoengos ou verde cana) no descascador de cerejas.

Figura 1- Processo de beneficiamento por via úmida

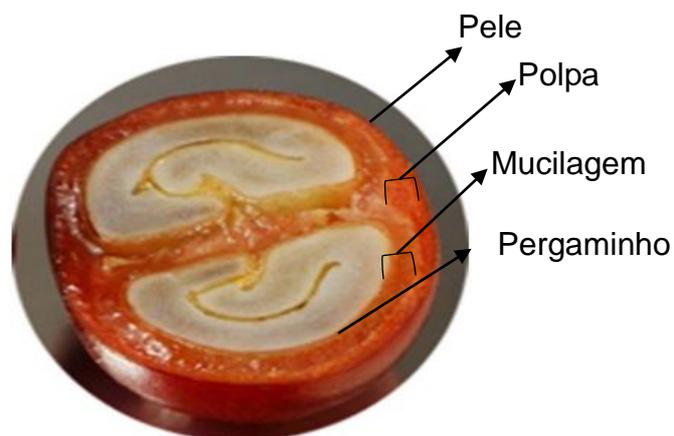


Fonte: Adaptação de Martinez, Sermyagina, Carneiro, Vakkilainen e Cardoso (2019)

O fruto do café (Figura 2), também conhecido como cereja, tem um exocarpo verde chamado pele ou casca quando imaturo e um exocarpo vermelho ou amarelo dependendo da variedade. O exocarpo é constituído por uma monocamada de células poligonais compactas parenquimatosas cobertas com uma substância cerosa com a finalidade de proteger o conteúdo interno da fruta. O conteúdo de cereja é uma polpa gelatinoso-péctica de aproximadamente 2 mm de espessura (mesocarpo), envolvendo uma camada pectinácea de mucilagem firmemente

aderida a um pergaminho que encapsula os grãos ou sementes, sendo este último coberto por uma camada esclerótica fina e próxima, chamada silverskin (FRANCA; OLIVEIRA, 2019).

Figura 2 - Partes do conteúdo do grão de café



Fonte: Adaptado de Franca e Oliveira, (2019)

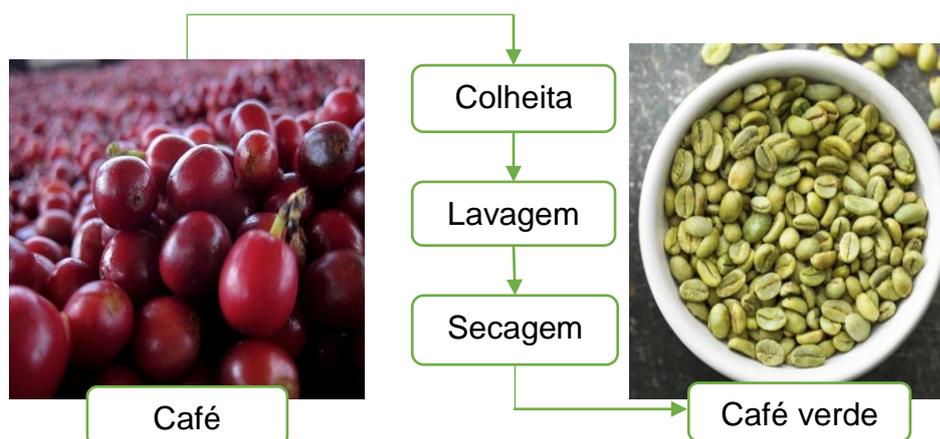
A polpa é componente do fruto e possui alto teor de umidade, constituindo cerca de 29% do peso seco do fruto, representando assim um volume considerável de resíduos quando descartada. Para a maioria dos usos deve ser desidratada, com elevado dispêndio do ponto de vista energético (VEGRO; CARVALHO, 2012).

Após a separação, é feito o despulpamento. Em máquinas apropriadas, são retiradas as cascas e polpa do fruto com 43% a partir de café cereja. No cilindro do descascador, os frutos são pressionados contra uma peneira rompendo a casca dos frutos maduros e liberando os grãos com parte da mucilagem com 12% da café cereja. Juntamente com a casca, passam pela peneira e caem no separador de casca, sendo a casca removida por um parafuso sem fim. O café cereja descascado sai em uma bica e os frutos verdes, resistentes ao esmagamento, saem intactos por outra bica (HADDIS; DEVI, 2008; HOSEINI; COCCO; CASUCCI; CARDELLI; CORTI, 2021).

Após esse processo, o café passa por um processo de secagem. No passado, os cafés eram espalhados em um terreiro e secavam expostos ao sol. O processo era demorado e durava quase três semanas. Hoje a secagem é feita por meio de secadores mecânicos, atualmente as fazendas aproveitam o poder calorífico da

lenha para esquentar os secadores mecanizados: o café entra em um compartimento a 140° C e sai quase totalmente seco com teor de umidade de 12% e aquele grão é nomeado café verde (Figura 3), após a secagem o pergaminho seco equivale ao 6,1% a partir de café cereja (BRANDO; BRANDO, 2014).

Figura 3 - Obtenção do café verde



Fonte: Autor

### 2.3 SUBPRODUTOS POLUENTES DA PRODUÇÃO DE CAFÉ

O processamento dos frutos do café, por via úmida, é uma atividade com alto consumo de água e que gera grande quantidade de matéria orgânica. O consumo de água no processamento da café cereja atinge de 40-45 L para cada quilograma de café processado (PUJOL; LIU; GOMINHO; OLIVELLA; FIOLE; VILLAESCUSA; PEREIRA, 2013). Durante os processos de lavagem, descascamento e despulpamento, diversas impurezas aderidas ao café como fragmentos de folhas, de ramos, dos frutos, das cascas e a mucilagem se juntam à água, formando a água residuária do café, e devido ao seu potencial poluidor, essa água não pode ser lançada em corpos hídricos sem prévio tratamento

A carga orgânica gerada no processamento pós-colheita do café produzido por via úmida atinge valores de entre 3000 a 18.000 mg/l (em termos de DBO), e em termos de a demanda química de oxigênio (DQO), poderia estar entre 15.000 e 30.000 mg/l (DEVI; SINGH; KUMAR, 2008; RATTAN; PARANDE; NAGARAJU; GHIWARI, 2015). O efeito da poluição orgânicos e a diminuição ou insuficiência de oxigeno e opacidade em corpos hídricos são os principais fatores notáveis, assim

como a demanda de oxigênio começa a exceder a oferta e a diminuição do teor de oxigênio lentamente cria a condição anaeróbia no meio onde o efluente foi descarregado. Além disso a presença de produtos químicos tóxicos como taninos fenólicos e alcaloides são responsáveis da inibição da degradação biológica ou a cauterização orgânica (CHANDRASEKHAR; CAYETANO; MEHREZ; KUMAR; KIM, 2020; WOLDESENBET; WOLDEYES; SINGH, 2014).

Entretanto, o conteúdo orgânico dos efluentes pode variar de uma planta para outra (DADI; MENGISTIE; TEREFE; GETAHUN; HADDIS; BIRKE; BEYENE; LUIS; BRUGGEN, 2018). Além disso, as águas residuais produzidas a partir do processamento úmido do café são ricas em açúcares, compostos fenólicos, ácidos graxos, lignina, celulose, substâncias pécticas e outras macromoléculas, pois está relacionada à remoção da mucilagem ligada aos grãos. Isto ocorre porque o desmucilador, que trabalha com água, tem um controle rigoroso da saída deste componente, sendo possível controlar quanto será desmucilado, o que permite a geração de água com maior concentração de nutrientes (CAMPOS; PINTO; MELO; ROCHA; COIMBRA, 2021). Essas características, se presentes no solo, inibem a germinação de sementes e causam deficiência de manganês no solo, prejudicando indiretamente as lavouras agrícolas, impedindo a penetração da luz solar em porções mais profundas dos corpos d'água (SAHANA; SRIKANTHA; MAHESH; SWAMY, 2018). Do mesmo modo, possuem baixo pH, o qual pode trazer impacto nos recursos naturais e uso da terra (CHEN; JIANG; LI, 2018).

Durante a safra que vai de maio até agosto, além do descarte da água da produção de café, também se descartam resíduos, como casca de café. A disponibilidade de efluentes é grande, sendo comum seu despejo diretamente nos rios (VEGRO; CARVALHO, 2012). A polpa, a mucilagem e a água e lavagem constituem-se os principais resíduos do processamento, entretanto, em termos de volume, destaca-se a água utilizada em quase todo o processo e que carrega elevada quantidade de matéria orgânica.

Portanto, o descarte de polpa de café e efluente do processamento dos grãos constituem-se um problema ambiental emergente em todo o mundo devido à sua decomposição, que pode, inclusive, levar a uma emissão descontrolada de metano (CH<sub>4</sub>). Os resíduos e águas residuais do processamento do café são supostamente ricos em carboidratos e proteínas, sendo passíveis de digestão anaeróbia. Entretanto, a produção de biogás e a utilização e o gerenciamento de resíduos de

café em larga escala ainda permanecem um desafio em todo o mundo devido, não apenas à geração de gases de efeito estufa, mas também a seus altos teores de cafeína, fenóis e taninos livres, que são conhecidos agentes tóxicos para muitos processos biológicos (CHEN; JIANG; LI, 2018). Essas características reforçam a necessidade de pesquisas adicionais sobre o projeto de sistemas de tratamento dos resíduos da produção cafeeira, bem como a valorização deste processo com vistas à produção sustentável do café (DADI; MENGISTIE; TEREFE; GETAHUN; HADDIS; BIRKE; BEYENE; LUIS; BRUGGEN, 2018).

## 2.4 DIGESTÃO ANAERÓBIA

### 2.4.1 Conceito

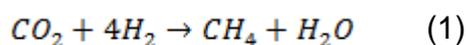
A digestão anaeróbia (DA) é um processo onde diferentes grupos de microrganismos trabalham interativamente na oxidação da matéria orgânica complexa em metano, gás carbônico, água, gás sulfídrico e amônia, assim como na síntese de novas células microbianas. De forma simplificada, a DA é dividida em duas fases: acidogênica e metanogênica, que podem ser divididas em várias rotas metabólicas, com participação de diversos grupos microbianos; posicionando a digestão anaeróbia como uma tecnologia de recuperação de energia de propósito único para um processo versátil na recuperação integrada de recursos orgânicos (VRIEZE, 2020).

A fase de hidrólise consiste na quebra de materiais particulados complexos (polímeros) em materiais dissolvidos mais simples (moléculas menores) por meio da ação de exoenzimas excretadas pelas bactérias fermentativas hidrolíticas, os quais podem atravessar as paredes celulares das bactérias fermentativas. Entre os gêneros de bactérias com capacidade hidrolítica destacam-se *Clostridium*, *Micrococcus* e *Staphylococcus* na degradação de lipídeos a ácidos graxos; os gêneros *Bacteroides*, *Butyvirio*, *Clostridium*, *Fusobacterium*, etc, produtores de proteases para degradação de proteínas a aminoácidos; e *Clostridium*, *Staphylococcus*, *Acetivirio*, *Eubacterium* que são gêneros produtores de amilases para degradação de polissacarídeos em açúcares menores. Os produtos solúveis, oriundos da fase de hidrólise, são metabolizados no interior das células na etapa acidogênica, e os microrganismos fermentativos são os primeiros a atuar na etapa

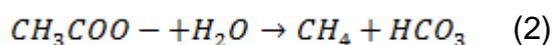
sequencial de degradação do substrato (KOTHARI; PANDEY; KUMAR; TYAGI; TYAGI, 2014).

Na fase de acetogênese, as bactérias sintróficas acetogênicas são responsáveis pela oxidação de compostos orgânicos intermediários produzidos na etapa acidogênica, como propionato e butirato, em substratos apropriados para os microrganismos metanogênicos (acetato, hidrogênio e dióxido de carbono). A formação de acetato resulta na produção de grande quantidade de H<sub>2</sub> fazendo com que o valor do pH no meio aquoso decresça. A importância dos organismos acetogênicos no processo de digestão anaeróbia decorre do fato de que cerca de 60 a 70% dos elétrons do substrato original são canalizados para a produção de acetato (KOTHARI; PANDEY; KUMAR; TYAGI; TYAGI, 2014).

A metanogênese é a quarta e última etapa do processo de biodigestão anaeróbia e resulta na produção de metano e dióxido de carbono, efetuada pelos microrganismos metanogênicos atualmente classificados dentro do domínio Archaea (LEE; ROUT; SHIN; BAE, 2019). As rotas de produção de metano podem ser realizadas via metanogênese hidrogenotrófica, na qual o dióxido de carbono é reduzido a metano utilizando elétrons derivados da oxidação do hidrogênio (Equação 1)



Ou pela metanogênese acetoclástica, que envolve a clivagem do acetato em um grupo metil e CO, posteriormente oxidado, gerando elétrons para a redução do grupo metil em metano (Equação 2)



#### 2.4.2 Requisitos ambientais do processo biológico

As condições nutricionais proporcionam a seleção dos microrganismos mais adaptados ao ambiente, porém, a digestão anaeróbia é particularmente suscetível a um controle rigoroso das condições ambientais, uma vez que o processo requer uma interação dos microrganismos fermentativos e metanogênicos (HUSSAIN; DUBEY, 2017).

Os nutrientes das populações microbianas envolvidas nos processos biológicos anaeróbios são definidos usualmente a partir da composição química das células microbianas responsáveis pela etapa metanogênica (Tabela 1).

Tabela 1 - Composição química dos microrganismos metanogênicos

<b>Elemento</b>	<b>Concentração (g/kg SST)</b>	<b>Elemento</b>	<b>Concentração (g/kg SST)</b>
Nitrogênio	65	Enxofre	10
Fósforo	15	Cálcio	4
Potássio	10	Magnésio	3

Fonte: Lettinga *et al* (1996).

O nitrogênio é requerido em maiores concentrações para o crescimento dos microrganismos, assim como o fósforo. A maioria dos microrganismos, incluindo os metanogênicos, utiliza o sulfeto como fonte de enxofre. Em relação a temperatura, a formação microbiana de metano pode ocorrer numa faixa bastante ampla de temperatura (0 a 97 °C), sendo associados dois níveis ótimos de temperatura, um na faixa mesófila (30 a 35 °C) e outro na faixa termófila (50 a 55 °C). O pH, a alcalinidade e os ácidos graxos de cadeia curta são três fatores ambientais relacionados entre si no controle do processo anaeróbio. O pH afeta diretamente a atividade de enzimas e, indiretamente, influencia na toxicidade de um número variado de compostos. Ademais, os produtores de metano têm um crescimento ótimo na faixa de pH entre 6,6 e 7,4 (HUSSAIN; KUMAR; MEHROTRA, 2015). Outro fator importante é a alcalinidade, que é a capacidade de uma solução em evitar mudanças no pH. Nos processos anaeróbios, os dois principais fatores que afetam o pH são o ácido carbônico e os ácidos voláteis, sendo que o bicarbonato atua como principal composto na manutenção do pH em sistemas anaeróbios, em função do valor de  $pK_1$  estar próximo a 6,3 (ZHOU; YANG; ZHENG; PU; LIU; WANG; ZHANG; DENG, 2019).

## 2.5 POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE METANO E SUA CONVERSÃO ENERGÉTICA

### 2.5.1 Metano

O metano pode ser obtido a partir da digestão anaeróbia de material orgânico, sendo o principal composto do biogás (ANP, 2017). O biogás é uma mistura de aproximadamente 60% de metano, 40% de dióxido de carbono e uma pequena fração (< 1%) contendo vapor de água, sulfeto de hidrogênio e alguns outros gases (MATHERI; SETHUNYA; BELAID; MUZENDA, 2018). Quando purificado para mais de 99% em metano, torna-se idêntico ao gás natural e pode receber a denominação

de bio-metano, constituindo-se um biocombustível gasoso. Assim como o biogás, é utilizado para gerar calor usando caldeiras, para iluminar residências, cozinhar e como combustível para veículos conforme resolução ANP N° 685, de 29.06.2017 (ANP, 2017).

### **2.5.2 Atividade metanogênica específica (AME)**

A atividade metanogênica específica pode ser definido como a capacidade máxima de produção de metano por um consórcio de microrganismo anaeróbios na presença de determinado substrato ou também pode ser definido pela quantidade de biogás ou biometano por grama de sólidos voláteis (SV) contidos no substrato usado no processo de DA. É realizado em condições controladas de laboratório para garantir a atividade bioquímica máxima de conversão de matéria orgânica em metano por meio de um teste de atividade metanogênica específica (AME). O princípio do teste consiste em misturar um substrato orgânico com um inóculo anaeróbio sob condições experimentais e operacionais definidas, sendo o metano gerado durante a digestão anaeróbia quantificado por um método de medição específico (BUNTNER; SPANJERS; VAN LIER, 2014).

Diferentes substratos podem ser utilizados na produção de metano, entre eles, os resíduos líquidos, principalmente com alta concentração de matéria orgânica; resíduos sólidos, como bioresíduos de origem municipal; lodo de tratamento de águas residuais municipais ou industriais; resíduos de colheitas; resíduos agroindustriais e materiais de origem animal. A composição e concentração do substrato podem causar fenômenos de inibição que influenciam o metabolismo dos microrganismos e, portanto, afetam a quantidade de CH<sub>4</sub> gerado. Por este motivo, devem ser caracterizados, antes do ensaio, tanto em termos de parâmetros físico-químicos, quanto de sua composição elementar (SILVA; DONZELES; SOARES; MORELI; VITOR, 2014).

Embora a origem do inóculo seja um fator relevante, a afinidade com o novo substrato também é um aspecto importante a ser levado em consideração tanto para garantir tempos de partida mais curtos dos reatores, quanto maior atividade biológica e, conseqüentemente, maior produção de metano. O inóculo é normalmente caracterizado em termos de parâmetros físico-químicos que permitem identificar o teor de biomassa ativa (SV/ST) e sua capacidade de produção de CH<sub>4</sub>.

As condições operacionais do teste PBM geralmente envolvem o uso de reatores em batelada, com ou sem agitação e temperatura controlada. A determinação do volume de metano produzido pode ser realizada por métodos volumétricos e manométricos, sendo a composição do biogás determinada por cromatografia gasosa (PIN; BARROS; LORA; OLMO; e; RIBEIRO; ROCHA, 2020).

### 2.5.3. Potencial bioquímico teórico de metano (PBTM) e conversão em energia

O aproveitamento do potencial energético dos resíduos de processamento de café pode ser uma alternativa térmica e elétrica para utilização do biogás. Uma forma adicional de estimar o potencial de produção de metano a partir de diferente substratos é o cálculo do potencial bioquímico teórico de metano (PBTM), que baseia-se no princípio de que 1 g de DQO removida gera aproximadamente 0,35 NLCH<sub>4</sub> (CHANDRASEKHAR; CAYETANO; MEHREZ; KUMAR; KIM, 2020). Nas condições normais de temperatura e pressão (CNTP). A relação entre NLCH<sub>4</sub> / g DQO, em adição aos valores de DQO e SVT dos resíduos permite determinar o potencial teórico de geração de CH<sub>4</sub> (Eq. 3)

$$PBTM = 0,35 \frac{NLCH_4}{g DQO} \cdot \frac{DQO_{residuo}}{SVT_{residuo}} \quad (3)$$

Onde:

*PBMT* é o potencial bioquímico teórico de metano (*NL CH<sub>4</sub>/g DQO*); DQO é a demanda química de oxigênio (*g O<sub>2</sub>/L*) e SVT é sólidos voláteis totais (*g SVT/L*).

Uma vez obtido o PBMT, pode ser calculada a quantidade de energia elétrica que poderia ser gerada a partir do CH<sub>4</sub> produzido pela DA. Para o cálculo da energia elétrica, considera-se o rendimento do motor de combustão interna, com um poder calorífico inferior (PCI) do metano de 9.4 kWh/m<sup>3</sup> para um conteúdo de 60% de metano Mersoni e Reichert (2017) com uma eficiência baseada numa unidade de 100 kW calculada como saída de energia térmica de 82,5 kwh/m<sup>3</sup> (HAKAWATI; SMYTH; MCCULLOUGH; ROSA; ROONEY, 2017).

A determinação do potencial bioquímico de metano estabelece a conversão da carga orgânica do substrato em metano. A partir dessa avaliação é possível avaliar questões econômicas e de gerenciamento para a implementação em grandes

escalas, como o rendimento máximo de produção de metano (LABATUT; ANGENENT; SCOTT, 2011).

Para cálculo de energia elétrica (Eq. 5), está dependerá da energia térmica, da eficiência da tecnologia de conversão (CANO; PÉREZ-ELVIRA; FDZ-POLANCO, 2015).

$$ET = V_{CH_4} * PCI_{CH_4} * MCI \quad (4)$$

Onde:  $ET_{biogás}$ : Energia térmica do biogás (MJ/m<sup>3</sup>);  $V_{CH_4}$ :volumem do metano (m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>);  $PCI_{CH_4}$ : Poder Calorifico Inferior, MCI: Rendimento de operação do motor (82.5 %) (HAKAWATI; SMYTH; MCCULLOUGH; ROSA; ROONEY, 2017).

Com o valor encontrado da potência térmica do biogás, calcula-se então a energia elétrica gerada por dia a partir da tecnologia de conversão conforme equação 6.

$$E_e = V_{CH_4} * MCI * PCI_{CH_4} \quad (5)$$

Onde:  $E_e$  é energia elétrica gerada (kWh/dia); MCI: Rendimento de operação do motor (33%);  $PCI_{CH_4}$ : Poder Calorifico Inferior (PÖSCHL; WARD; OWENDE, 2010).

## 2.6 UTILIZAÇÃO DA CO-DIGESTÃO PARA AUMENTO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Aprofundar o estudo energético é fundamental para avaliar as questões econômicas e de gerenciamento de projetos para o aumento de escala. Uma grande variedade de componentes presente nos resíduos pode causar inibição ou falhas no processo de digestão. Uma forma de contornar a baixa produção de metano a partir de determinados substratos é a utilização de co-substratos, por meio de um processo de co-digestão. A adição de substratos complementares adiciona nutrientes, favorece a cinética microbiana, ou dilui substâncias tóxicas, favorecendo a produção máxima de biogás (BODENMULLER FILHO, 2019)

Nessa perspectiva, Luz, Cordiner, Manni, Mulone e Rocco (2017) obtiveram resultados positivos para o biogás produzido a partir da co-digestão de borra de café

e dejetos bovinos, com uma produção de 254 mLCH<sub>4</sub>/gSV em temperatura de 37°C e após 22 dias de operações do reator. Foi observado um aumento de 10% na fração de metano do biogás, com um PCI médio de cerca de 28,24 MJ/kg, em função da utilização de dois substratos simultaneamente, o que reforça o potencial de recuperação de energia da fração líquida da borra de café pelo processo de digestão anaeróbia. Passos, Cordeiro, Baeta, Aquino e Perez-Elvira (2018) avaliaram a co-digestão da casca de café e da biomassa de microalgas, sendo que está provou ser compatível e eficiente para aumentar a produção de biogás em testes de atividade metanogênica específica. Os resultados foram de 0,38 d<sup>-1</sup> para velocidade máxima de produção de metano e 196 mLCH<sub>4</sub>/gSV para o rendimento de metano. A co-digestão da casca de café e da biomassa microalgal após a hidrólise térmica a 120 °C foi capaz de gerar uma eletricidade líquida de 0,159 kWh/kgST, valores superiores aos obtidos apenas com a casca de café.

Luz, Volpe, Fiori, Manni, Cordiner, Mulone e Rocco (2018) realizaram um estudo da digestão anaeróbia de hidrocarvão (borra de café submetida a três diferentes temperaturas: 180, 220 e 250 °C) com dejetos bovinos e observaram que os resíduos tratados a 180° C apresentaram a maior taxa de produção de metano (46 mLCH<sub>4</sub>/gSV\*d). O biogás gerado apresentou uma composição média de 70% em teor de metano e volume máximo de metano produzido foi de 491 mLCH<sub>4</sub>/gSV (tempo de operação de 25 dias).

## 2.7 USOS E APLICAÇÕES DO BIOGÁS

O biogás é um recurso renovável usado pelas pequenas e grandes indústrias e plantas de tratamento de esgoto, com aplicações energéticas para combater os desafios do aquecimento global. Desta forma, será necessário fazer uso desta energia para atender a demanda elétrica de maneira sustentável e controlável (Stürmer; Theuretzbacher; Saracevic, 2020). Como um recurso amplamente usado na geração de eletricidade e a conversão bioquímica da biomassa residual, pode contribuir de forma significativa para a produção flexível e programável de energia elétrica e térmica renovável (YANG; HUANG; ZHAO; HUANG; MIAO; XU; RUAN, 2015).

Na Tailândia, o potencial de utilização do biogás como combustível é uma prioridade, o sistema está composto de 275 usinas de biogás geraram 1.091,65

milhões de m<sup>3</sup>/ano de biogás, em um sistema de geração de eletricidade de 45,25% maior do que o gerador de motor térmico típico (SAENGPRAJAK; KATCHAROEN; CHOCKUA; PIAMDEE, 2019). Já as tecnologias comerciais como Sonix ou Biosonator acoplam um pré-tratamento que pode recuperar tanto o calor do motor a biogás quanto a energia elétrica na mesma medida que os pré-tratamentos elétricos. Desta forma, a integração energética total pode ser alcançada em plantas de hidrólise térmica, assim as fazendas como unidades produtoras se tornam como área de estudo para aproveitar a energia dos efluentes e resíduos descartados da sua atividade, sua vez que podem atuar como biorefinaria e centralizar o manejo de distintos efluentes da cadeia agropecuária, focados na geração de biogás para produção de energia elétrica ou térmica.

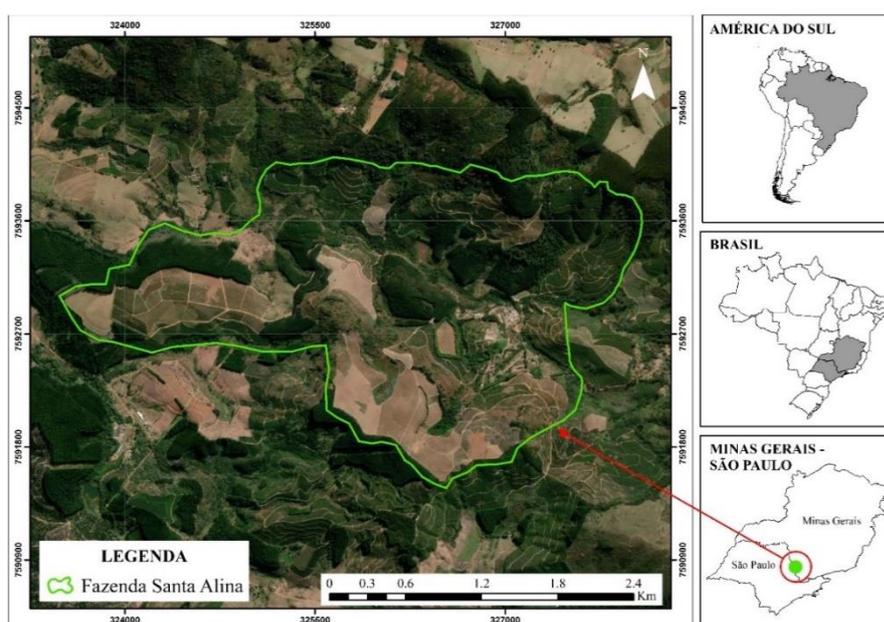
### 3 METODOLOGIA

Este trabalho foi dividido em duas grandes etapas, a primeira onde foi avaliado experimentalmente o potencial de produção de metano do resíduo denominado mucilagem coletado em uma propriedade produtora de café e a segunda, na qual foi realizada uma avaliação energético-ambiental por meio da proposição de cenários envolvendo a digestão anaeróbia. Nesta segunda etapa, utilizaram-se na proposição de cenários, resíduos da mucilagem e água de lavagem oriundos do processamento dos grãos de café, e sua integração por meio de co-digestão com lodo de tratamento aeróbio ou soro de leite.

#### 3.1 ÁREA DE ESTUDO – FAZENDO PRODUTORA DE CAFÉ

A área de estudo neste trabalho foi a fazenda Santa Alina, localizada em São Sebastião da Gramma, no Estado de São Paulo, próximo a Poços de Caldas, no Sul de Minas Gerais, e está localizada nas coordenadas 21°45'52" S por 46°40'23" O (Figura 3). A área da fazenda é de 257 hectares de café (utilizados para formação e produção de café). A produção anual de previsão para safra 2020 é de 5.000 sacas (300 toneladas de café).

Figura 4 - Localização da área de estudo em Google Earth: Fazenda Santa Alina



Fonte: Autor

## 3.2 ETAPA 1: ENSAIOS EXPERIMENTAIS PARA PRODUÇÃO DE METANO

Nesta etapa, foram realizados em escala laboratorial, ensaios de produção bioquímica de metano por meio de ensaios de atividade metanogênica específica utilizando como substrato a mucilagem dos grãos de café.

### 3.2.1 Coleta e caracterização da mucilagem de café

A mucilagem de café foi coletada na fazenda Santa Alina no mesmo dia que foi extraída dos grãos de café para preservação das características originais. Depois da coleta do grão de café, separação e lavagem, é feito o despulpamento onde é retirada a polpa do fruto, com descarte da mucilagem (mel de café). Um volume de 10 litros foi coletado e armazenado a temperatura ambiente, sendo posteriormente caracterizado em termos de demanda química de oxigênio (DQO), pH, alcalinidade e ácido voláteis. Também foram coletados 5 litros de água de lavagem do processamento de grãos de café e caracterizados em termos de DQO, pH, alcalinidade e ácido voláteis, utilizados posteriormente como referência teórica para o estudo de cenários propostos.

### 3.2.2 Inóculo

O inóculo utilizado foi lodo granular oriundo de um reator UASB utilizado no tratamento de resíduos de abatedouro de frangos (Avícola Dacar – Tietê, SP, Brasil). A fração de sólidos do lodo utilizado foi de 50,43% ST e 38,43 % SV/ST.

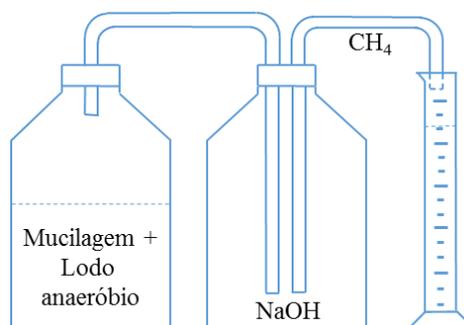
### 3.2.3 Procedimento operacional dos ensaios de AME

Os ensaios de potencial bioquímico de metano foram realizados em reatores em batelada. Foram utilizados frascos de vidro borossilicato com volume total de 500 ml. Em cada reator foi adicionado 25 ml de lodo granular anaeróbico e 300 ml de mucilagem café, de acordo com as variáveis analisadas em cada fase experimental. O volume de headspace foi de 275 ml. A concentração de biomassa no interior de cada reator foi de 5g SVT/L. A operação os reatores teve duração de cinco dias e os mesmos foram mantidos em condições mesófilas a 30 °C, com agitação de 150 rpm

com auxílio de shaker orbital. Todos os reatores foram submetidos a fluxo de  $N_2$  por 5 min para assegurar a presença de ambiente anaeróbio antes do início dos experimentos.

Os testes foram realizados em triplicatas e os frascos foram selados com septo de borracha perfurados para a passagem de mangueiras de fluxo de gás para coleta de metano. A determinação de metano foi realizada pelo procedimento de deslocamento de volume em proveta, após lavagem do biogás em solução de NaOH 0,005 M para captura de  $CO_2$ , de acordo com a Figura 5. O volume de metano em cada reator foi aferido a cada 1h em proveta.

Figura 5 - Montagem experimental para medição do metano produzido por deslocamento volumétrico.



Fonte: Do Autor.

Os ensaios de potencial de produção de metano a partir da mucilagem do café foram realizados combinando-se as variáveis pH inicial e adição de nutrientes (nitrogênio e fósforo), de acordo com a Tabela 2. Para cada grupo de ensaios, foi realizado em triplicata um comparativo endógeno, mantendo-se as mesmas condições experimentais, exceto a presença de mucilagem, que foi substituída por água destilada.

Tabela 2 - Procedimento experimental dos testes de AME

<b>Tipos de tratamentos</b>	<b>Adição de Mucilagem</b>	<b>Correção de pH para 6,6</b>	<b>Adição de Nutrientes (N e P)</b>
1	Não	Sim	Sim
	Sim	Sim	Sim
2	Não	Sim	Não
	Sim	Sim	Não
3	Não	Não	Sim
	Sim	Não	Sim
4	Não	Não	Não
	Sim	Não	Não

Fonte: Autor

O pH dos reatores foi corrigido com solução de NaOH 0.005 M, de acordo com as exigências experimentais de cada etapa. O pH de 6,6 foi determinado em função dos requisitos das arqueias metanogênicas, buscando otimizar a atividade de produção de metano e adição mínima de alcalinizante. Os reatores avaliados na presença de nutrientes foram alimentados com 3 ml de solução de nutrientes adaptada de (NERY; POZZI; DAMIANOVIC; DOMINGUES; ZAIAT, 2008) de acordo com a Tabela 3. A cada reator foi adicionado 1ml de solução de metais traços (OWEN; STUCKEY; HEALY; YOUNG; MCCARTY, 1979), de acordo com a Tabela 4.

Tabela 3 - Composição da solução de nutrientes

<b>Nutrientes</b>	<b>Concentração (mg/L)</b>
Ureia	115,0
NiCl	5
Fe(SO <sub>4</sub> )	25
FeCl <sub>3</sub>	2,5
CaCl <sub>2</sub>	20,6
KHPO <sub>4</sub>	53,6
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	13
NaHPO <sub>4</sub>	27

Fonte: Adaptada de Nery, Pozzi, Damianovic, Domingues e Zaiat (2008)

Tabela 4 - Composição da solução de metais Traços

<b>Composto</b>	<b>Concentração (g/L)</b>
C <sub>6</sub> H <sub>9</sub> CO <sub>6</sub>	1,5
MnSO <sub>4</sub> .H <sub>2</sub> O	0,5
FeSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	0,1
CoCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	0,1
ZnSO <sub>4</sub> .5H <sub>2</sub> O	0,1
AlK(SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> .12HO	0,01
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	0,01
NaMoO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O	0,01
NiCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	0,05
NaSeO <sub>3</sub> .5H <sub>2</sub> O	0,263
Na <sub>2</sub> WO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O	0,025

Fonte: Adaptada de Pöschl, Ward e Owende (2010)

### 3.2.4 Análises físico – químicas

As análises físico-químicas do afluente e efluente dos reatores foram realizadas na montagem dos reatores e ao término de cada etapa experimental. Foram avaliados: pH (método 4500 –H+ B), DQO (método 5220 D) e série de sólidos (método de densidade) de acordo com o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (2012). A determinação de alcalinidade e ácido voláteis foi realizada pelo método titulométrico 2320B proposto por DiLallo e Albertson (1961) e (RIPLEY *et al.*, 1986).

A identificação e concentração dos elementos nutrientes e micronutrientes das amostras de mucilagem e efluente de café, foi realizada em espectrômetro de fluorescência de Raios-X, de acordo com Debrun, 2013. A quantificação de metano foi analisada por medição volumétrica utilizando-se proveta de polipropileno Nalgon de 250±2 ml. Os análise de macronutrientes e micronutrientes foram feitos pelo Laboratório de Recursos Analíticos e de Calibração (LRAC) da Unicamp.

### 3.2.5 Tratamentos de dados

Com base nos dados experimentais da produção cumulativa de metano de cada condição experimento, a equação modificada de Gompertz (Eq. 6) foi utilizada para estimar dos parâmetros experimentais: potencial de produção de metano, taxa máxima de produção de metano e tempo da fase lag (POSMANIK; KIM; LABATUT; USACK; ANGENENT, 2020).

$$P_{CH_4}(t) = P_{max} * \exp \left\{ -\exp \left[ \left( \frac{(R_{max} * t)}{P_{max}} \right) * (\lambda - t) + 1 \right] \right\} \quad (6)$$

Onde:

$P_{CH_4}(t)$  =é produção cumulativa de metano (NmI $CH_4$ ) no tempo

$P_{max}$ =é potencial produção de metano (NmI $CH_4$ )

$R_{max}$ =é taxa produção máximo de metano (NmL $CH_4$  d<sup>-1</sup>)

$\lambda$ =é fase *lag*(d).

### 3.3 ETAPA 2: PROPOSIÇÃO DE CENÁRIOS PARA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO E AMBIENTAL DA DIGESTÃO ANAERÓBIA

Para avaliação do potencial energético-térmico, foram elaborados dois cenários a partir da definição de um cenário base. A proposição de dois cenários foi baseada em uma integração entre as atividades agroindustriais da região, buscando minimização dos custos e maximização dos resultados ambientais e energéticos. Em todos os cenários avaliados (Tabela 5), a conversão de biogás em energia elétrica foi avaliada em função da demanda da fazenda de café, seja para abastecimento industrial, quanto para abastecimento doméstico (casa dos trabalhadores). A conversão de biogás em energia térmica será utilizada para quantificação do seu potencial na secagem dos grãos de café, em substituição ao sistema atualmente utilizado pela fazenda. E, finalmente, a utilização do biometano será avaliada quanto a sua aplicabilidade em substituição ao diesel de tratores e caminhões e outras atividades úteis na fazenda.

Tabela 5 - Cenários propostos para avaliação do potencial energético do biogás

		<i>Entressafra</i>				<i>Safra</i>				<i>Entressafra</i>			
		<i>Jan</i>	<i>Fev</i>	<i>Mar</i>	<i>Abr</i>	<i>Mai</i>	<i>Jun</i>	<i>Jul</i>	<i>Ago</i>	<i>Set</i>	<i>Out</i>	<i>Nov</i>	<i>Dez</i>
<b>Cenário Base</b>						Resíduos do processamento do café							
<b>Cenário 1</b>	Lodo aeróbio					Resíduos do processamento do café				Lodo aeróbio			
<b>Cenário 2</b>	Soro leite					Resíduos do processamento do café				Soro leite			

Fonte: Autor

### 3.3.1 Cenário Base

No primeiro cenário a ser avaliado foi denominado de cenário Base. Neste cenário, foram considerados somente os efluentes (mucilagem e água de lavagem do café) produzidos pela Fazenda Santa Alina no período da safra, que vai de maio a agosto. No cenário base, o reator anaeróbio foi hipoteticamente operado somente por 3 meses, sendo a operação suspensa entre os meses de setembro a maio, quando não haveria disponibilidade de subprodutos da produção de café.

### 3.3.2 Cenário 1

No cenário 1, o reator anaeróbio foi hipoteticamente operado com o resíduo de lodo aeróbio no período de entressafra (setembro a abril) resultante de tratamento aeróbio de esgoto doméstico.

### 3.3.2 Cenário 2

No cenário 2, foi considerado que o reator seria operado somente com soro de leite no período de entressafra (setembro a maio) resultante do processamento de produtos laticínios.

### 3.3.4 Dados utilizados na proposição e avaliação dos cenários

Os dados de entrada na avaliação dos cenários propostos foram obtidos experimentalmente no caso do potencial teórico de produção de metano a partir da mucilagem e por meio de resultados previamente publicados na literatura, no caso dos demais parâmetros (Tabela 6).

Tabela 6 - Parâmetros utilizados na proposição e avaliação dos cenários.

(Continua)

DADOS DA ENTRADA	VALOR E UNIDADE	REFERENCIA
Produção de Café na safra	300 Tn	FAZENDA
Área da fazenda	257 ha	FAZENDA
Mucilagem/ kg café verde	0,54 L	(SCHWAN; GRAGHAM, 2014)
Água de lavagem dos grãos/ kg café verde	40 L	(PEREIRA; MOREIRA, 2021)
Tempo de safra	90 dias	FAZENDA
Tempo de entressafra	270 dias	FAZENDA
Produtividade da fazenda	19,45 Saca/ha	AUTOR
DQO lodo aeróbio de esgoto	31,9 gO <sub>2</sub> /L	(ALVES <i>et al.</i> , 2020; KIM; HAN; SHIN, 2004)
DQO soro de leite	65 kg/m <sup>3</sup>	(ESCALANTE-HERNÁNDEZ; CASTRO-MOLANO; BESSON; JAIMES-ESTÉVEZ, 2017) (ESCALANTE <i>et al.</i> , 2017)
PCI CH <sub>4</sub> em Cal. adotado	35,89 MJ/m <sup>3</sup>	(CRUZ, 2019)
PCI CH <sub>4</sub> adotado	9,972 kWh/m <sup>3</sup>	(PEREIRA, 2018)
Eficiência motor	33 %	(PÖSCHL; WARD; OWENDE, 2010)
PBTM	0,35NLCH <sub>4</sub> /gDQO	(CHANDRASEKHAR <i>et al.</i> , 2020)
Gasto energia da Fazenda Santa Alina	53,11 kWh/mês	FAZENDA
Gasto térmico para secagem para kg de café verde adotado	4,47 MJ/kg	AUTOR
Fator de conversão de café verde a café cereja	6 kg	(CHAPAGAIN; HOEKSTRA, 2007)
Consumo de lenha por kg de café verde	0,00154 m <sup>3</sup> /kg	(KING; CHANDLER; CHANDLER; ARCE; RAUDALES; TRUBEY, 2009)
Densidade aparente da lenha	221,83 kg/m <sup>3</sup>	(DÍEZ; GÓMEZ; PÉREZ, 2018)

Tabela 6 - Parâmetros utilizados na proposição e avaliação dos cenários.

(Conclusão)

<b>DADOS DA ENTRADA</b>	<b>VALOR E UNIDADE</b>	<b>REFERENCIA</b>
PCI lenha	13.044,4 kJ/kg	(CARDOSO; SILVA; LACERDA; SOUSA, 2000)
PCI biogás	16.200 kJ/kg	(CARVAJAL-JARA; TAFUR-ESCANTA; VILLAVICENCIO-POVEDA; GUTIÉRREZ-GUALOTUÑA, 2018)
Consumo médio residências no Brasil	172,9 kWh/mês	(EPE, 2020)

Fonte: Autor.

Nesta etapa, os dados da tabela 6 foram utilizados para obter os resultados teóricos do potencial energético para o cenário base, cenário 1 e cenário 2, de acordo as informações obtidas diretamente da fazenda Santa Alina. O período de safra da produção de café é de 90 dias, isto significa que 270 dias restantes do ano são período de entressafra, dessa forma, incentiva-se a utilização de outros resíduos agroindustriais (lodo aeróbio e soro de leite) para a continuidade do funcionamento do reator durante o período onde não há processamento de café.

Para os cálculos do volume total de resíduos de café foi preciso conhecer a quantidade de mucilagem e volume de água residual produzida com relação à produção da fazenda de estudo. Para cada 1 kg de café verde são produzidos 0,54 L de mucilagem e 40 L de água de lavagem dos grãos (Tabela 6). Segundo dados obtidos diretamente na Fazenda Santa Alina, a produção de café é de 19,45 sacas/ha anualmente. Do mesmo modo para o cenário 1 e cenário 2, determinou a demanda química orgânica (DQO) a ser processada no reator no período de entressafra para os demais substratos, o lodo aeróbio e soro de leite (Tabela 6).

Nesse caso, para a aplicação da digestão anaeróbia dos resíduos de café para o cenário base, adotou-se um tempo de detenção hidráulica (TDH) de 24 horas e 20% de *headspace*. O projeto deste reator (em termos de volume) foi tomado como referência para o cenário base, visto que a vazão volumétrica dos resíduos de café (mucilagem e água de lavagem dos grãos) e o TDH já estavam previamente definidos. Os mesmos parâmetros de projeto foram mantidos para cenário 1 e para o

cenário 2, considerando-se que o mesmo reator foi utilizado no período de entressafra.

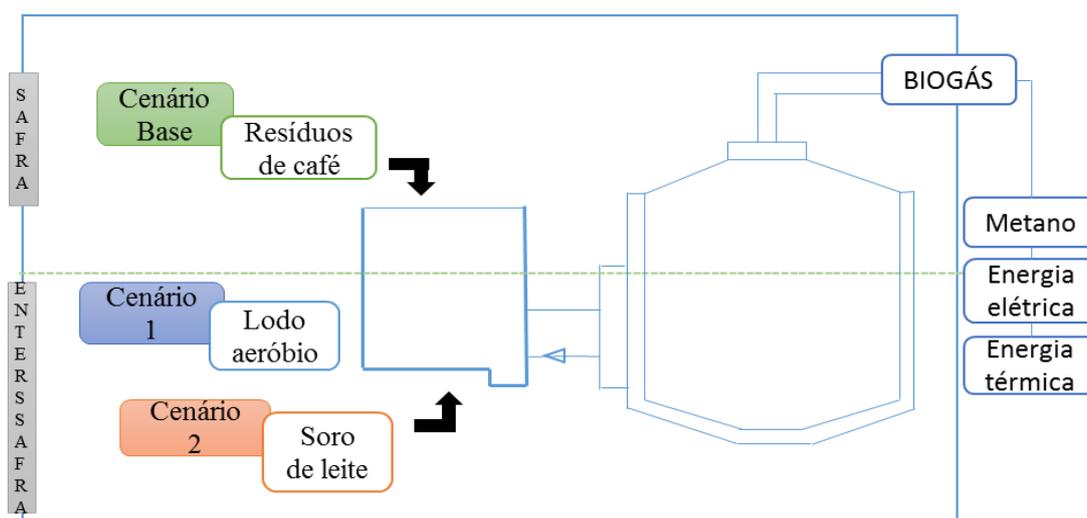
O volume de metano produzido foi calculado a partir da produção teórica de metano em relação a DQO removida,  $0,35 \text{ NLCH}_4/\text{gDQO}$ , considerando-se uma eficiência média de remoção de DQO de 85% e uma temperatura ambiente de  $20^\circ\text{C}$ .

Usando os dados apresentados de PCI metano e do rendimento do MCI da (Tabela 6), foi calculada a energia térmica com 85% de eficiência e elétrica utilizando as equações (4) e (5) no período da safra e entressafra.

Enquanto ao cálculo de consumo energético para a secagem de grão de café depois da lavagem, foi calculado a partir da quantidade lenha usada por cada quilograma café verde vezes o PCI da lenha e a produção total da fazenda que foi 300 toneladas de café verde.

A Figura 6 mostra a projeção do cenário base, cenário 1 e cenário 2 em cada período, ou seja, safra ou entressafra, com o objetivo de aproveitar o potencial energético a partir dos resíduos de café durante a safra e utilizar outros resíduos com a finalidade de manter a produção energética para a fazenda de café durante o período de entressafra.

Figura 6-Sistema da proposta cenários no período da safra/entressafra do processamento de café.



Fonte: Autor

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DO PROCESSAMENTO DOS GRÃOS DE CAFÉ DA FAZENDA SANTA ALINA

Após a coleta da mucilagem e água de lavagem dos grãos de café, os mesmos foram caracterizados em relação aos parâmetros descritos na Tabela 7.

Tabela 7 - Caracterização da mucilagem de grão de café de lavagem dos grãos obtidos na Fazenda Santa Alina

Parâmetros	Mucilagem do café		Água da lavagem do café	
	Teste inicial	Teste final	Teste inicial	Teste final
pH	5,4	3,7	4,2	3,4
DQO (mgO <sub>2</sub> /L)	7318	7156	1184	580
Alcalinidade total (mg/LCaCO <sub>3</sub> )	50	0	0	0
SV	349	746	115	127
ST (%)	40,3	-	6,2	-

Fonte: Autor

O pH de ambos os substratos se encontram em uma faixa mais ácida (5,4 para mucilagem e 4,2 para a água de lavagem), porém após 3 meses da coleta dos mesmos, observou-se uma acentuada acidificação dos substratos, para um pH de 3,7 para mucilagem e 3,4 para água de lavagem. Acredita-se que em função do alto teor orgânico, os substratos sejam facilmente degradáveis e tenham como subproduto ácidos de cadeia curta, que contribuem para valores de pH abaixo de 4,0 (ELHALIS; COX; FRANK; ZHAO, 2020). No caso da mucilagem, o conteúdo de ácidos voláteis dobrou (de  $350 \text{ mg HAc l}^{-1}$  para  $745 \text{ mg HAc l}^{-1}$ ) após 3 meses da coleta da amostra. O pH natural dos substratos dificulta a aplicação direta em processos anaeróbios sem prévia alcalinização, visto que o pH ótimo da metanogênese está na faixa de 6,5 a 7,5 (KULAPICHITR; BOROMPICHAICHARTKUL; SUPPAVORASATIT; CADWALLADER, 2019). Em função do baixo pH, a alcalinidade total detectada seria insuficiente para o processo anaeróbio utilizando mucilagem ( $50 \text{ mg CaCO}_3 \text{ l}^{-1}$ ) e ausente no caso da água de lavagem.

A mucilagem apresenta um teor de matéria orgânica, em termos de DQO, superior ( $7,4 \text{ gO}_2 \text{ l}^{-1}$ ) à água de lavagem dos grãos ( $1,184 \text{ gO}_2 \text{ l}^{-1}$ ), principalmente em função do seu maior teor de sólidos totais ( $40,3 \text{ gST l}^{-1}$ ), resultado do elevado teor de açúcares presentes neste substrato (NEU; PLEISSNER; MEHLMANN; SCHNEIDER; PUERTA-QUINTERO; VENUS, 2016). Ademais, a água de lavagem é utilizada em excesso e, portanto, permite grande diluição dos resíduos retirados durante o processamento do grão.

Em termos de nutrientes, os substratos apresentam concentrações de fósforo, enxofre e potássio que favorecem sua aplicação no processo anaeróbio, assim como a presença de ferro, um micronutriente essencial para o estabelecimento da metanogênese (Tabela 8).

Tabela 8 - Avaliação de nutrientes da mucilagem de grãos de café e água de lavagem dos grãos obtidas na Fazenda Santa Alina

<b>Nutrientes</b>	<b>Mucilagem do café</b>	<b>Água da lavagem do café</b>
Fosforo (mg/L)	56,1	20,3
Enxofre (mg/L)	39,1	8,9
Potássio (mg/L)	1659,2	375,3
Ferro (mg/L)	24,2	9,6
Alumínio (mg/L)	3,7	9,2
Cálcio (mg/L)	220,5	56,7
Cloro (mg/L)	73,9	21,8
Cobre (mg/L)	1,4	0,2
Magnésio (mg/L)	52,8	12,1
Manganésio (mg/L)	1,2	0,4
Sódio (mg/L)	8,5	8,1
Silício (mg/L)	13,3	15,4
Estrôncio (mg/L)	1,2	0,3
Zinco (mg/L)	0,9	0,4
Rubídio (mg/L)	1,6	0,3
Samário (mg/L)	1	0
Bromo (mg/L)	0	0,06

Fonte: Autor

#### 4.2 POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE METANO A PARTIR DA MUCILAGEM DE CAFÉ

Experimentalmente, o potencial de produção de café só foi determinado para a mucilagem caracterizada previamente. Esta decisão foi tomada em função do maior

teor de matéria orgânica deste efluente e, portanto, o maior potencial de produção de metano. Além disso, o pH inicial da mucilagem requer menor adição de alcalinizante do que a água de lavagem dos grãos. O consumo de matéria orgânica, a produção de alcalinidade e de ácidos voláteis e o volume acumulado de metano obtidos em todas as condições experimentais avaliadas estão descritos na Tabela 9.

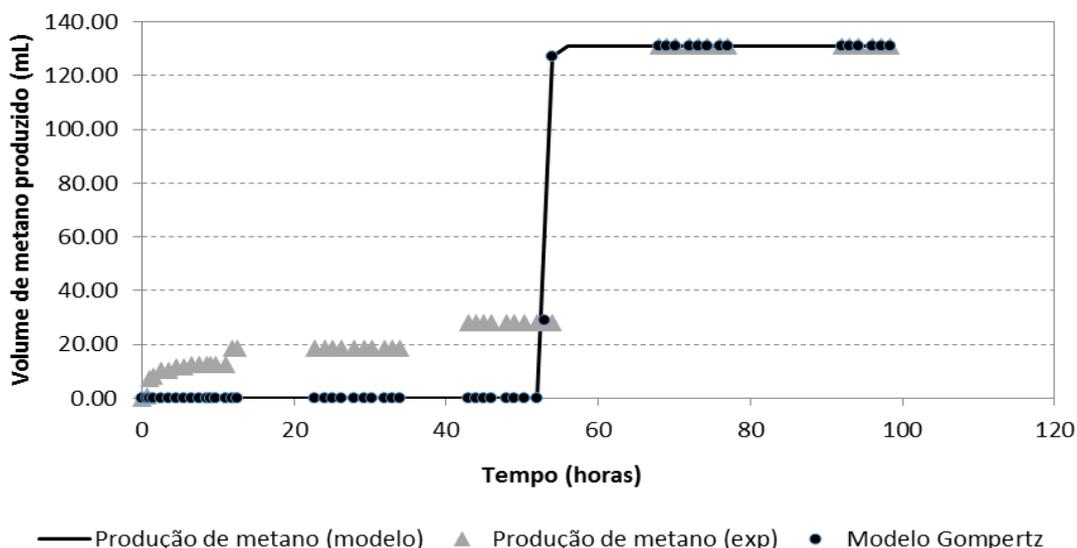
Tabela 9 - Resultados dos ensaios de atividade metanogênica específica com a mucilagem dos grãos de café (As barras de erro referem-se ao desvio padrão das triplicatas).

Parâmetros	Mucilagem			
	1	2	3	4
Tratamento	1	2	3	4
Correção de pH	Não	Sim	Não	Sim
Adição de nutrientes	Não	Não	Sim	Sim
pH <sub>i</sub>	3,78±0,03	6,6±0,03	3,78±0,04	6,6±0,03
pH <sub>f</sub>	3,88±0,03	7,19±0,03	4,06±0,04	7,27±0,03
DQO <sub>i</sub>	9756,25±0,17	7318,15±0,03	5152,5±1,35	3755±0,06
DQO <sub>f</sub>	8227,5±0,17	970,25±0,03	3538,75±1,35	718,4±0,06
%	16±0,17	87±0,03	31±1,35	81±0,06
(mg CaCO <sub>3</sub> /L) <sub>i</sub>	0	850±213,7	0	1570±115,19
(mg CaCO <sub>3</sub> /L) <sub>f</sub>	0	797±213,7	0	1127±115,19
(mg HAc/L) <sub>i</sub>	725,76±199,96	636,48±72,7	754,56±1110,8	720±270,8
(mg HAc/L) <sub>f</sub>	1040,52±199,96	75±72,7	880±1110,8	159±270,8
CH <sub>4</sub> (mL)	131±527,37	804±170,2	5±15,8	611±483,1

Fonte: Autor

O menor volume de biogás foi produzido pela primeira condição, onde não foi realizada correção de pH e nem adição de nutrientes (cerca de 131 NmLCH<sub>4</sub>), sendo que a produção iniciou-se apenas após 54h. A remoção de DQO, neste caso, foi de 16%, acompanhada de aumento dos ácidos voláteis (de 725,76 mg HAc l<sup>-1</sup> para 1040,52 mg HAc l<sup>-1</sup>), e pH final maior que o inicial (Figura 7).

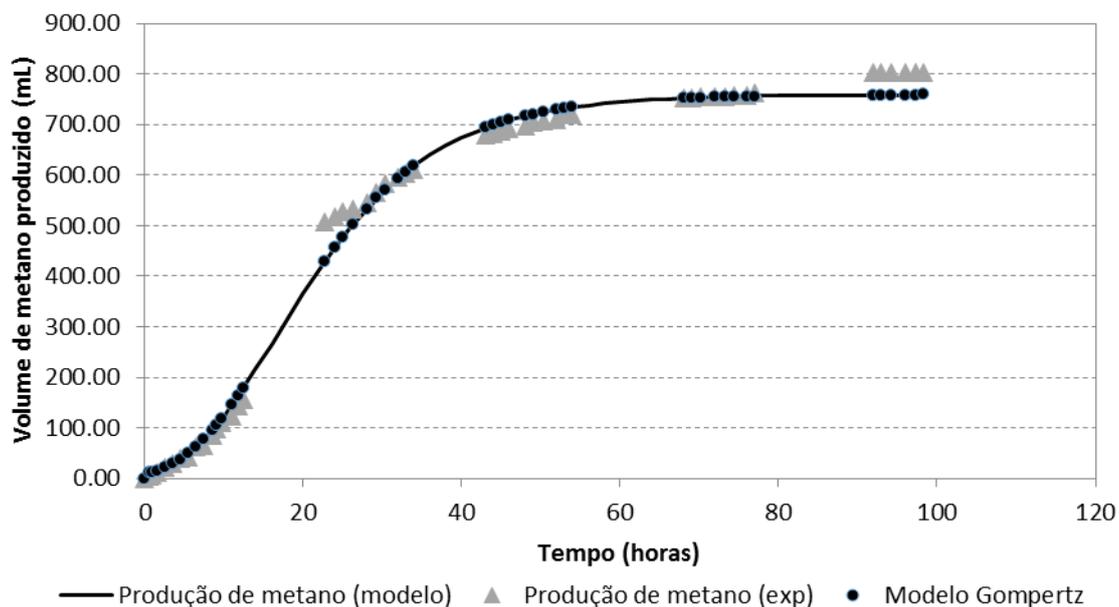
Figura 7 - Curva de produção de metano sem correção de pH/sem adição de nutrientes.



Fonte: Autor

Um adequado ambiente para o desenvolvimento de microrganismos precisa de um ótimo pH para seu crescimento, como pode ser observado nos ensaios com correção de pH e sem adição de nutrientes (Tabela 9), cuja produção de metano alcançou 804NmICH<sub>4</sub>. Observa-se na (Figura 8) que, a partir 22,8 horas, inicia-se a produção de metano, que alcança seu máximo em 92,0 horas. Os valores de pH mantiveram na faixa 6,6 para 7,2, entretanto a alcalinidade teve uma leve diminuição. Observou-se grande consumo de ácidos voláteis durante a digestão anaeróbia, resultando em elevada remoção de DQO (87%), indicando que ao final a matéria orgânica da mucilagem de café foi convertida em metano (SPEECE; PARKIN, 2016). Esses resultados são semelhantes aos relatados por Luz, Cordiner, Manni, Mulone e Rocco (2017) que observaram elevada produção de biogás, superior a 1 litro de CH<sub>4</sub>/g-SVT em um sistema alimentado com a fração líquida obtida pela filtração da borra de café. Os autores observaram um processo estável tanto em termos de alcalinidade, pH e ácidos graxos voláteis quanto níveis de amônia, redução de 31% de SVT e biogás com 43% de hidrogênio na fase inicial e metano (faixa de 40 a 90%) na etapa de estabilização.

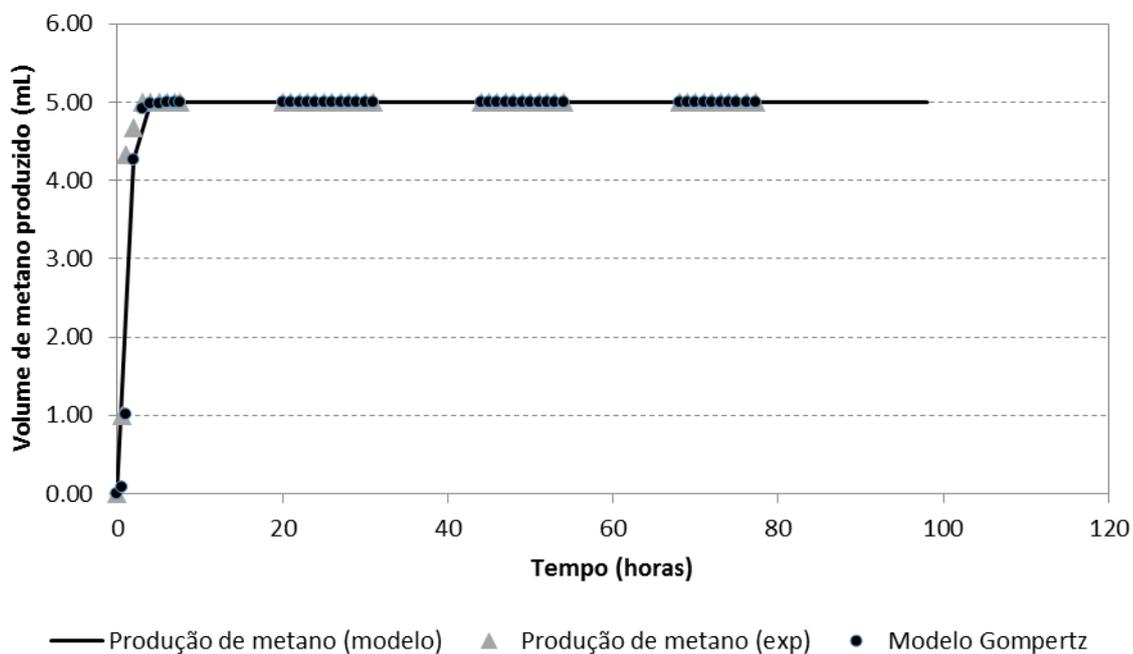
Figura 8 - Curva de produção de metano com correção de pH/sem adição de nutrientes.



Fonte: Autor

Na terceira condição, sem correção de pH e adição de nutrientes (Figura 9) houve uma remoção da matéria orgânica de 31%, com uma produção de metano quase que nula ( $5\text{Nm}^3\text{CH}_4$ ) (Figura 9). Além disso, observou-se um aumento nos ácidos de  $754,54\text{mgHACL}^{-1}$  para  $880\text{mgHACL}^{-1}$ . Segundo Battista, Fino e Mancini (2016), os efluentes ácidos precisam de uma adequação dos fatores que afetam o desenvolvimento da digestão anaeróbia, e dependem da sua caracterização física e química, rica em moléculas de alto valor e compostos orgânicos.

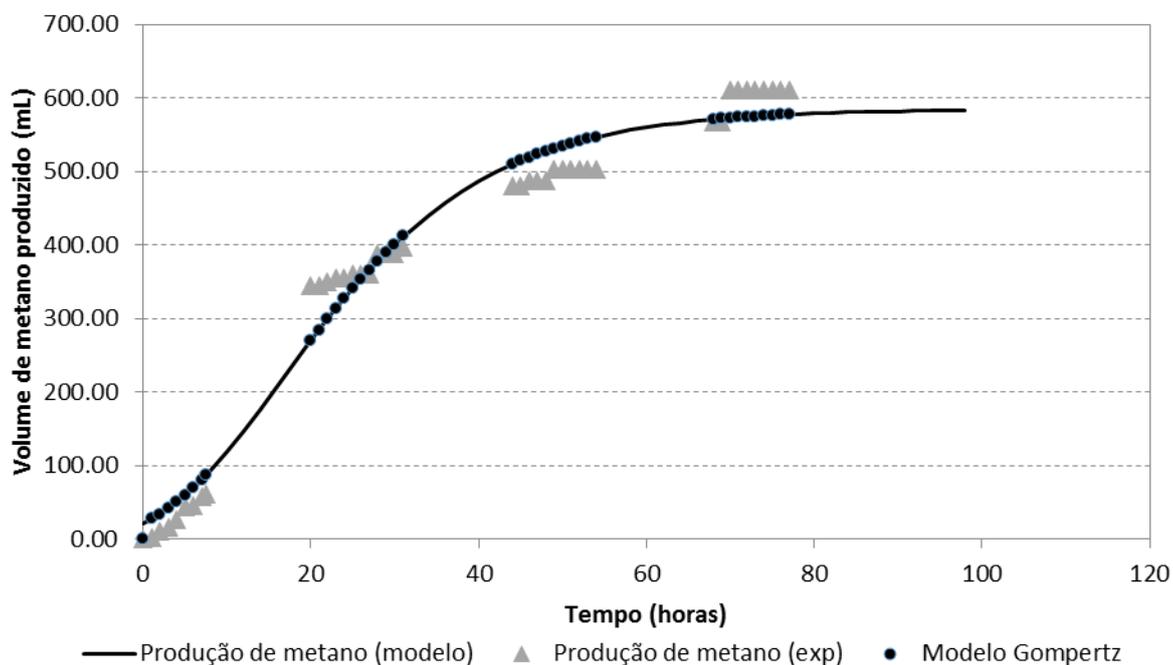
Figura 9 - Curva de produção de metano sem correção de pH/com adição de nutrientes.



Fonte: Autor

Por outro lado, a combinação entre ajuste de pH e presença de nutrientes resultou em uma produção de metano que se iniciou após um período de 20h e resultou em uma produção máxima de metano de 611NmI $\text{CH}_4$  após 70 horas. Nesta última condição, houve uma remoção de matéria de 81%, com diminuição da alcalinidade (1570mgCaCO $3\text{L}^{-1}$ ) para (1127mgCaCO $3\text{L}^{-1}$ ) e, especialmente, dos ácidos voláteis que foram consumidos de 720mgHAcL $^{-1}$  para 159mgHAcL $^{-1}$  (Figura 10).

Figura 10 - Curva de produção de metano com correção de pH/com adição de nutrientes.



Fonte: Autor

A quantidade de potássio nos resíduos avaliados (1659,2 mg/l) (Tabela 8) poderia ter dificultado o processo anaeróbico em função de um desequilíbrio da relação NPK. Segundo (JIMÉNEZ; GUARDIA-PUEBLA; ROMERO-ROMERO; CISNEROS-ORTIZ; GUERRA; MORGAN-SAGASTUME; NOYOLA, 2014), os resíduos de agricultura e resíduos industriais para a produção de metano dependem das condições nutricionais para o desenvolvimento da comunidade microbiana.

Embora o efeito significativo da condição de adição de nutrientes nos processos anaeróbicos é evidente, sabe-se que alguns elementos inorgânicos tendem a precipitar no ambiente aquoso do digestor anaeróbico e, além disso, existem ligantes inorgânicos e orgânicos que complexam os elementos, reduzindo sua biodisponibilidade. Os consórcios microbianos metanogênicos também têm um requisito obrigatório de minerais, fazendo com que a eficiência do processo seja prejudicada em certos casos por limitações na biodisponibilidade desses elementos (HUSSAIN; KUMAR; MEHROTRA, 2015).

Analisando-se de forma global a influência do pH e da adição de nutrientes, ficou evidente que a correção de pH tem papel fundamental no estabelecimento da

metanogênese. A produção de metano acumulada, o tempo de fase lag e taxa produção máxima de metano estão relacionadas diretamente com correção de pH e adição de nutrientes, como demonstrado na Tabela 10.

Tabela 10 - Resultados dos parâmetros da equação modificada de Gompertz para os tratamentos: (1), (2), (3) e (4)

<i>Tratamento</i>	1	2	2	3
<i>Correção de pH</i>	Não	Sim	Não	Sim
<i>Adição de nutrientes</i>	Não	Não	Sim	Sim
<i>Tempo (horas)</i>	77,0	92,0	25,0	70,0
<i>Produção máxima de CH<sub>4</sub> (ml)</i>	131	804	5	611
<i>P (ml)</i>	130,99	759,39	4,99	584,81
<i>λ (h)</i>	52,86	5,54	0,77	2,63
<i>Rm (ml/h)</i>	188,86	25,40	4,27	15,52
<i>Coef</i>	0,956	0,997	0,906	0,987

Fonte: Autor

Os parâmetros obtidos pelo ajuste das curvas cumulativas de metano concordaram com as observações prévias em relação à dependência do ajuste de pH. Sem adição de nutrientes, o sistema com correção de pH atinge um pico de produção de metano de cerca de 760 ml como indicado pelo modelo. A correção de pH aliada a adição de nutrientes não tem efeito mais positivo do que somente a correção de pH, o que indica que a suplementação de nitrogênio e fósforo pode ser eliminada do processo biológico. Em relação a fase lag, a correção do pH inicial também atuou como fator positivo para que o tempo de início da produção de biogás fosse reduzido, sendo de 5,54h para os sistemas sem adição de nutrientes e 2,63h com adição de nutrientes.

A fase lag, por si só, é um parâmetro relevante somente quando se consideram sistemas em batelada. A operação de reatores metanogênicos em escala plena deve ser considerada em função da taxa de produção de metano, visto que após o estabelecimento de um regime de operação estacionário, a fase lag perde importância e é mais interessante que se mantenham altas taxas de produção de metano. As taxas máximas de produção de metano também foram favorecidas pelo ajuste de pH e, nesse caso, ela foi maior sem adição de nutrientes porque foi

mantido os nutrientes do substrato original, por outro lado para o tratamento quatro foram adicionados nutrientes causo um desequilíbrio pela ausência de alguns nutrientes básicos como nitrogênio.

Para o primeiro ensaio (sem ajuste de pH e adição de nutrientes), obteve-se uma taxa muito mais elevada que a demais condições, entretanto, observou-se nessa condição baixo volume total de metano. Porém o gráfico (Fig. 5) mostra o formato de um platô muito pronunciado, que pode ter contribuído para que no momento do ajuste, a velocidade de produção de metano fosse erroneamente ajustada para um valor muito alto como foi o obtido.

A produção endógena de metano a partir do lodo anaeróbio utilizado como inóculo também foi realizada (Tabela 11). Os dados indicaram que existe pouca ou nenhuma influência na produção de metano a partir da biomassa anaeróbia. O inóculo também não se constitui contribuinte para a fração solúvel de DQO, porém adiciona ao sistema uma fração de compostos que conferem alcalinidade ao sistema.

Tabela 11 - Resultados do experimento sem mucilagem (As barras de erro referem-se ao desvio padrão das triplicatas).

Parâmetros	Sem Mucilagem			
	1	2	3	4
Tratamento	1	2	3	4
Correção de pH	Não	Sim	Não	Sim
Adição de nutrientes	Não	Não	Sim	Sim
PH <sub>inicial</sub>	3,78±0,11	6,6±0,03	3,78±0,11	6,6±0,06
PH <sub>final</sub>	7,16±0,11	7,19±0,03	7,37 ±0,11	7,27±0,06
DQO <sub>inicial</sub>	0	0	0	0
DQO <sub>final</sub>	0	0	0	0
%	0	0	0	0
(mg CaCO <sub>3</sub> /L) <sub>inicial</sub>	0	30±52,7	0	0
(mg CaCO <sub>3</sub> /L) <sub>final</sub>	130±52,7	140±52,7	197±137,2	140±52,7
(mg HAc/L) <sub>inicial</sub>	5,52±0,5	5,52±0	5,52±1,5	12±1,59
(mg HAc/L) <sub>final</sub>	13,7±0,5	13,8±0	17,5±1,5	20,2±1,59
CH <sub>4</sub> (mL)	2±1,75	8±19,0	9±9,29	29±73,84

Fonte: Autor.

### 4.3 SÍNTESE DE RESULTADOS TEÓRICOS DO CENÁRIO BASE – PERÍODO SAFRA

A determinação do PBM da mucilagem e água de lavagem de grão de café foi obtida substituindo-se os valores na equação (3), (4) e (5). Para a mucilagem, o PBMT foi de  $0,083\text{NLCH}_4/\text{gSTV}$ , enquanto para a água de lavagem foi de  $0,087\text{NLCH}_4/\text{gSTV}$ .

Os dados apresentados na Tabela 12 foram obtidos a partir de conversões dos parâmetros descritos na Tabela 6 e 7. O volume de mucilagem foi de  $162\text{ m}^3$  durante toda a safra, enquanto o volume de água da lavagem dos grãos de café foi de  $12.000\text{ m}^3$ . As diferenças devem-se à porcentagem da mucilagem do grão de café (aproximadamente 2 mm de espessura por grão de café), totalizando 0,54 L de mucilagem por quilograma de café, enquanto que para a mesma quantidade de café cereja são gerados 40 L de água de lavagem.

Do mesmo modo, determinou-se que a vazão volumétrica da mucilagem no período da safra (90 dias), foi de  $1,80\text{ m}^3$  mucilagem/dia, enquanto para a água da lavagem dos grãos de café foi de  $133,33\text{ m}^3$  água/dia. De acordo com Rattan, Parande, Nagaraju e Ghiwari (2015), a geração de grandes quantidades de volume de água residual pode ser de até  $15\text{ m}^3$  por tonelada de cerejas, quando não são implementadas rotas de reciclo ou reutilização da água no processamento de café.

Tabela 12 - Dados da entrada de tanque de alimentação no período da safra

Parâmetro	Mucilagem	Água da lavagem de café
Volume total ( $\text{m}^3$ )	162	12.000
DQO ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	7,4	1,182
Q ( $\text{m}^3/\text{dia}$ )	1,80	133,33

Fonte: Autor.

A partir dos cálculos da Tabela 12, determinou-se o volume reator necessário para a digestão anaeróbia dos resíduos de café, foi encontrado  $180\text{ m}^3$  com uma consideração de 20% *Headspace* mais 5% leito, e a carga orgânica volumétrica de  $1,26\text{ kg DQO}/\text{m}^3\text{d}$  para a vazão volumétrica total de  $135,13\text{ m}^3/\text{dia}$  (mucilagem mais água da lavagem de café), como mostrado na Tabela 13.

Tabela 13 - Dimensão do reator para período safra/entressafra

Parâmetro	Valor
Q total (m <sup>3</sup> /dia)	135,13
TDH (h)	24
COV (kg/m <sup>3</sup> d)	1,26
Concentração (gDQO/m <sup>3</sup> )	1,26
Volume Útil (m <sup>3</sup> )	135,13
Volumem total (m <sup>3</sup> )	180

Fonte: Autor.

Como mostra a Tabela 14, os resíduos de café (mucilagem e água da lavagem) apresentaram potencial de produção de metano de 4.919,31 m<sup>3</sup> durante toda a safra, para uma condição de ambiental de 20°C mais 85% de matéria orgânica. Um estudo realizado por Selvamurugan, Doraisamy e Maheswari (2010) revelou que o tratamento de águas residuais de processamento de café para um TDH de 18h e taxa de carregamento orgânico de 9,55 kg/m<sup>3</sup>d, a quantidade máxima de metano produzida foi de 0,504 m<sup>3</sup>//kg de sólidos totais (TS), com 0,465 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg de DBO removida e 0,25m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg de DQO removida, utilizando-se um reator híbrido anaeróbio de fluxo ascendente. Esses são resultados semelhantes aos valores obtidos neste trabalho, já que quanto mais alta é a matéria orgânica dos resíduos de café, maior quantidade de volume de metano é produzida (Tabela 14).

Tabela 14 - Quantidade de metano no período na safra

Parâmetro	Valor
PBM (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kgDQO)	0,35
Concentração (kg/ m <sup>3</sup> )	171,19
CH <sub>4</sub> (m <sup>3</sup> /d)	55
CH <sub>4</sub> total (m <sup>3</sup> )	4.919,31

Fonte: Autor

#### 4.4 SÍNTESE DE RESULTADOS TEÓRICOS DO CENÁRIO 1 E CENÁRIO 2 – PERÍODO ENTRESSAFRA

Nesta etapa do trabalho, a proposta do cenário 1 e cenário 2 para o período da entressafra preconiza a utilização do mesmo reator proposto para o período da safra, como mostra a Tabela 5 e figura 6, sendo mantidos o volume do reator, a

vazão volumétrica, a concentração de DQO e carga orgânica aplicada por dia (Tabela 15).

Tabela 15 - Parâmetros mantidos para o período de entressafra

Parâmetro	Valor
Q (m <sup>3</sup> /dia)	135,13
Concentração (kg/ m <sup>3</sup> )	171,19
COV (kg/m <sup>3</sup> d)	1,26
Volume do reator (m <sup>3</sup> ) *	180

Fonte: Autor.

A Tabela 16 mostra os dados calculados, teoricamente, para os parâmetros considerando- o substrato do cenário 1. Neste cenário, para as dimensões do reator proposto, são necessários 36.486,00 m<sup>3</sup> de lodo aeróbio durante os 270 dias de entressafra. Porém, para manutenção da COV, no cenário 1, torna-se necessário diluir o substrato com 35.037,08 m<sup>3</sup> de água no total dos 270 dias. A água utilizada nesse processo de diluição poderia a água de lavagem do processamento dos grãos de café após o tratamento no período da safra.

Tabela 16 - Dados da entrada de tanque de alimentação para o cenário 1.

Parâmetro	Lodo aeróbio	Volumem de água
Volume total (m <sup>3</sup> )	36.486,00	35.037,08
DQO (kg/m <sup>3</sup> )	31,9	-
Q (m <sup>3</sup> /dia)	5,37	129,77

Fonte: Autor

A tabela 17 mostra os dados teóricos dos parâmetros para o período de entressafra no caso do cenário 2, utilizando-se soro de leite como substrato. Nesse caso, são necessários 36.486,00 m<sup>3</sup> de soro de leite e um volume de 35.774,92 m<sup>3</sup> de água para diluição.

Como foi mostrado na Tabela 16 e Tabela 17, há uma limitação para se manter um só substrato durante o período da entressafra devido às especificidades do resíduo do café e o volume de reator necessário para ser operado durante a safra.

Tabela 17 - Dados da entrada de tanque de alimentação para o cenário 2.

Parâmetro	Soro de leite	Volumem de água
Volume total (m <sup>3</sup> )	36.486,00	35.774,92
DQO (kg/m <sup>3</sup> )	65	-
Q (m <sup>3</sup> /dia)	2,63	132,50

Fonte: Autor

A Tabela 18 mostra o resultado da produção de metano no período de entressafra para o cenário 1 e cenário 2, com um total de 14.757,94 m<sup>3</sup> de metano para o período de 270 dias. O uso de substratos como soro de leite ou lodo aeróbio de acordo são atraentes devido à sua carga orgânica e quantidade produzida. Segundo o Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento, o Brasil tem uma maior produção de soro de leite de 2,7 milhões de toneladas por ano, sendo que esse substrato vem sendo um desafio para seu uso na digestão anaeróbia (PITHAN; BUENO; SÁ, 2017). Potencial bioquímico de metano na co-digestão de soro de leite e dejetos de aves em uma proporção (1:1) foi de 223 mL/gSV, o poderia contribuir com uma energia anual de cerca de 520.000 kWh de eletricidade para uma fazenda (CARLINI; CASTELLUCCI; MONETI, 2015). Outro estudo reportou uma produção de biogás de 469,2 L/kg dia a partir do soro mais lodo residual de laticínios, com uma remoção de matéria orgânica de 81% (ESCALANTE-HERNÁNDEZ; CASTRO-MOLANO; BESSON; JAIMES-ESTÉVEZ, 2017).

Tabela 18 - Quantidade e metano produzido para o cenário 1 e cenário 2.

Parâmetro	Valor
PBM (m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /kgDQO)	0,35
Concentração (kg/ m <sup>3</sup> )	171,19
CH <sub>4</sub> (m <sup>3</sup> /d) *	59,92
CH <sub>4</sub> total (m <sup>3</sup> )	14.757,94

Fonte: Autor

A utilização de lodo aeróbio no período de entressafra contribuiu para a economia circular deste resíduo, tornando-se útil na produção de bioenergia. De acordo com Singh, Upadhyay, Shrivastava e Vivekanand (2020), as vantagens do lodo aeróbio de esgoto são amplamente conhecidas, é um material nutritivo e orgânico abundante na natureza sob a forma de lodo fino. A partir deste substrato,

grandes volumes de metano são gerados nas plantas de tratamento, pelo qual hoje tornou-se uma oportunidade de ser utilizado como energia em todo o mundo. Segundo Alves, Mahler, Oliveira, Reis e Bassin (2020), o lodo aeróbio como substrato teve uma produção de metano de 138,2 mLCH<sub>4</sub>/gSV. Na China, a digestão anaeróbia de 5 milhões de toneladas de lodo aeróbio de esgoto produzem, a partir de 400 plantas de tratamento de esgoto, mais de 2,5 bilhões de m<sup>3</sup> de biogás (4 milhões de kWh) (YIN; SHEN; ZHU; HUANG; LOU; YUAN, 2018).

Chen, Wen, Jiang, Lei, Li e Li (2019), utilizando resíduos de café com dejetos bovino, alcançaram uma taxa de produção de metano de 0,28LCH<sub>4</sub>/gDQO. Passos, Ortega e Donoso-Bravo (2017) mostraram uma taxa de produção de metano de 196 ml CH<sub>4</sub>/gVS no processamento dos resíduos de café, com uma taxa de máxima de produção de metano de 0,38 litros de metano por dia, e concluíram que o alto volume de metano está relacionado com a maior disponibilidade da fonte de carbono.

Entretanto, cabe salientar que o processo de tratamento de resíduos do café será viável ambientalmente sempre que as unidades produtoras de café incluam o reusar ou reutilização da água de lavagem ou possuam um suprimento sem custo de água doce (TUCKER, 2014).

#### 4.5 POTENCIAL ENERGÉTICO DA DIGESTÃO ANAERÓBIA DOS TRÊS CENÁRIOS

A partir dos dados obtidos para todos os cenários avaliados, calculou-se o potencial de energia térmica (ET) e energia elétrica (EE) para o período de safra e entressafra, em função do volume de metano produzido (Tabela 19).

No período da safra, para o cenário base, foi determinado um potencial de 145.657,15 MJ de energia térmica, e 16.188,28 kWh de energia elétrica. Miito e Banadda (2017) relataram a geração de 18,34 MJ por quilograma de resíduos de café, e indicaram que esse por meio desta alternativa era possível abastecer 0,7% do total da energia consumida em Uganda,.

No período da entressafra, a energia térmica total seria de 529.662,35 MJ e 48.564,83 kWh de energia elétrica. Considerando o abastecimento energético do ano inteiro, tem-se 64.753,10 kWh a partir do cenário base e cenário 1 ou cenário 2.

Tabela 19 - Síntese de resultados teóricos energéticos para três cenários projetados

Parâmetros	Safra	Entressafra	
	CB	C1	C2
$V_{\text{SUBSTRATO}} \text{ (m}^3\text{)}$	12.162	36.486	36.486
$Q_{\text{CH}_4} \text{ (m}^3\text{/dia)}$	59,92	59,92	59,92
$V_{\text{CH}_4} \text{ (m}^3\text{)}$	4.919,31	14.757,94	14.757,94
ET (MJ)	145.657,15	436.971,43	436.971,43
EE (kWh)	16.188,28	48.564,83	48.564,83
EE (kWh/mês)	5.396,09	5.396,09	5.396,09

Fonte: Autor

O processo tem potencial para a produção em maior escala de biogás rico em energia a partir de resíduos do processamento de café, por meio da digestão anaeróbica. O processo descrito neste estudo é tecnicamente viável, produz biogás com alta energia de combustão e, portanto, promissor para maiores benefícios econômicos. A diferença dos potenciais de metano dos resíduos encontrados na literatura deve-se a quantidade da água de lavagem do processamento dos grãos de café produzida sob distintas condições.

#### 4.6 SUBSTITUIÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO EM ETAPAS E ATIVIDADES DO PROCESSAMENTO DE CAFÉ

Nesta etapa do trabalho incluem-se as projeções de substituição energética na etapa do processamento de café (secagem dos grãos de café) e abastecimento de residências durante o período da entressafra. Para isso, considerou-se os resultados da energia térmica (ET) e energia elétrica (EE) produzidas a partir do cenário base, cenário 1 e cenário 2, levando-se em consideração o sistema de operação na fazenda Santa Alina.

De acordo com SILVA & CARDOSO, (2001), para cada quilograma de café pergaminho são consumidos 2,98MJ de energia térmica. Considerando-se o fator de conversão de café pergaminho seco para café cereja, seriam necessários 198.666,67 MJ por safra na etapa de secagem dos grãos, como mostra a Tabela 20, a partir do valor de PCI do biogás de 16,2 kJ/kg. Ao se comparar esse valor com o PCI da lenha é possível ressaltar que o biogás tem um maior PCI, além de minimizar a geração de cinzas (BRANDELET; ROSE; ROGAUME; ROGAUME, 2018).

Tabela 20 - Dados da energia térmica por safra do processamento de café

Parâmetros	Valor	Unidade
Consumo de ET	4,47	MJ/kg café verde
Produção total de café/safra	300.000	kg café cereja
ET requerido	1.339.630,4	MJ/safra
PCI lenha	13.044,4	kJ/kg
PCI biogás	16,2	kJ/kg

Fonte: Autor

Analisando o cenário base (Tabela 21), a energia térmica gerada pela queima do biogás poderia abastecer os secadores utilizados na última etapa do beneficiamento de café e os quais consomem bastante energia, já que esta etapa requer uma energia térmica de 1.339.630,4 MJ por safra segundo os resultados da Tabela 20. De acordo aos dados obtidos no cenário base, seria possível substituir apenas 11% dessa energia, com um total de 145.657,15 MJ por safra. Pois o biogás será usado como fonte de energia similar às da lenha atualmente empregada na fazenda para secagem de café. Apesar de compensar com uma porcentagem baixa de energia diminuiu a quantidade e a combustão atualmente praticada da lenha, com conseqüente redução nas emissões.

Avaliando a energia elétrica gerada pelo processo de digestão anaeróbia, durante a entressafra poderiam ser abastecidas mensalmente 31 residências por mês, seja para cenário 1 ou cenário 2. Contribuindo com a necessidade com um gasto energético de 172,9 kWh/mês de acordo ao manual energético do Brasil Empresa de Pesquisa Energética (2020), finalmente a o uso de biogás a partir do lodo aeróbio e soro de leite pode resultar diminuições de impacto ambiental e suprir as necessidades básicas das vivendas na fazenda.

Tabela 21 - Resultado da substituição por cada período de processamento de café.

Parâmetros	Safra	Entressafra	
	CB	C1	C2
ET disponível	145.657,15		
Substituição ET (%)	11%	-	-
ET disponível		5.396,09	5.396,09
Substituição EE (Residências/mês)	-	31	31

Fonte: Autor

Segundo Pin, Barros, Lora, Olmo, Santos, Ribeiro e Rocha (2020), um cenário economicamente e ambientalmente viável é alcançado se o efluentes mantem uma faixa de 3,449gCOD/L de matéria orgânica, o que poderia garantir uma produção de metano para abastecer 13 cilindros P45 de GLP para a etapa de torrefação de café. Além disso, a partir deste trabalho, se define o uso de resíduos agroindústrias como um futuro sustentável inclusive para as unidades produtoras em pequena e média escala de produtos agroindustrial, de acordo com a Agencia Nacional de Energia Elétrica, que por meio da Lei nº 10.438/2002, fomenta os setores agroindustriais a produzir energia elétrica de acordo Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica - ANEEL

A vantagem de utilizar o biogás como fonte de energia não é somente a geração de energia, mas também uma possível solução para problemas relativos ao manejo de lodo aeróbio e soro de leite no Brasil. Desta forma, parte desta energia poderia ser usada nas instalações onde o biogás é produzido e a outra parte poderia atender a rede elétrica local da própria fazenda durante o ano inteiro.

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho destacou tanto a mucilagem como a água de lavagem do café possuem elevado potencial para a geração de biogás. A presença de potássio, para ambos os substratos, acima dos limites ambientais, irá requerer um adequado tratamento para posterior descarte desse efluente. O volume de metano alcançado pela mucilagem com ajuste de pH foi de  $804\text{NmCH}_4/\text{gSTV}$ , enquanto os dados teóricos de PBM da água da lavagem indicam  $0,087\text{NLCH}_4/\text{gSTV}$ . A proposta do cenário base indica que a partir do resíduo de café poderia ser produzido um volume total de metano de  $4.919,31\text{m}^3$  durante o período de safra e suprir 11% da energia térmica requerida para a secagem dos grãos de café. Substituindo-se os resíduos de café pelo lodo aeróbio ou soro de leite, é possível abastecer 31 residências no período de entressafra. A proposição de diferentes cenários buscando uma integração da unidade produtora de café e substratos adicionais no período de entressafra destacam que existe viabilidade ambiental e energética para que a digestão anaeróbia seja utilizada como alternativa no manejo dos resíduos do café sendo viável para a operação durante o ano. Estudos adicionais são necessários para determinação da viabilidade econômica desta proposta, bem como a integração com demais resíduos da agroindústria.

## REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica**. Disponível em:

<<https://www.aneel.gov.br/proinfra>>. Acesso em: 19 jul. 2021.

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Brasília.

Resolução nº 685, de 29 de junho de 2017. **Controle da qualidade e a especificação do Biometano oriundo de aterros sanitários e estações de tratamento de esgoto destinado ao uso veicular e às instalações residenciais, industriais e Anpcomerciais**. 828. ed. Seção 2. Disponível em:

<http://www.anp.gov.br/biocombustiveis/biometano>

ALVES, Ingrid R.F.s.; MAHLER, Claudio F.; OLIVEIRA, Luciano B.; REIS, Marcelo M.; BASSIN, João P.. Assessing the use of crude glycerol from biodiesel production as an alternative to boost methane generation by anaerobic co-digestion of sewage sludge. **Biomass And Bioenergy**, [S.L.], v. 143, p. 105831, dez. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105831>.

BATTISTA, Federico; FINO, Debora; MANCINI, Giuseppe. Optimization of biogas production from coffee production waste. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 200, p. 884-890, jan. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.11.020>.

BODENMULLER FILHO, Anselmo. **Aplicação da espectroscopia de reflectância no infravermelho próximo (nirs) na determinação do potencial bioquímico de metano – revisão**: potencial bioquímico de metano. 2019. 21 f. Monografia (Especialização) - Curso de Especialista em Tecnologias da Cadeia Produtiva do Biogás, Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2018.

BRANDELET, Benoît; ROSE, Christophe; ROGAUME, Caroline; ROGAUME, Yann. Impact of ignition technique on total emissions of a firewood stove. **Biomass And Bioenergy**, [S.L.], v. 108, p. 15-24, jan. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.10.047>.

BRANDO, Carlos H. J .; BRANDO, Maria Fernanda P.. MethodS of coffee ferMentation and drying: coffee waste management and its application as a source of value-added products. In: SCHWAN, Rosane F.; FLEET, Graham H. **Cocoa and Coffee Fermentations**: methods of coffee fermentation and drying. Washington State University, Pullman, Wa, Usa: Boca Raton, 2014. Cap. 10. p. 227-545. (9780429062926). Disponível em: <http://sci-hub.tw/10.1201/b17536>. Acesso em: 10 ago. 2021.

BUNTNER, D.; SPANJERS, H.; VAN LIER, J.B.. The influence of hydrolysis induced biopolymers from recycled aerobic sludge on specific methanogenic activity and sludge filterability in an anaerobic membrane bioreactor. **Water Research**, [S.L.], v. 51, p. 284-292, mar. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2013.10.065>.

CAFEICULTURA (Rio Paraiba). **Processo de produção do café**: colheita. COLHEITA. 2006. Disponível em:

<https://revistacafeicultura.com.br/index.php?mat=6814>. Acesso em: 11 jun. 2019.

CAMPOS, Renata Cássia; PINTO, Vinícius Rodrigues Arruda; MELO, Laura Fernandes; ROCHA, Samuel José Silva Soares da; COIMBRA, Jane Sélia. New sustainable perspectives for “Coffee Wastewater” and other by-products: a critical review. **Future Foods**, [S.L.], v. 4, p. 100058, dez. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100058>.

CANO, R.; PÉREZ-ELVIRA, S.I.; FDZ-POLANCO, F.. Energy feasibility study of sludge pretreatments: a review. **Applied Energy**, [S.L.], v. 149, p. 176-185, jul. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.132>.

CARLINI, M.; CASTELLUCCI, S.; MONETI, M.. Biogas Production from Poultry Manure and Cheese Whey Wastewater under Mesophilic Conditions in Batch Reactor. **Energy Procedia**, [S.L.], v. 82, p. 811-818, dez. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.817>.

CARVAJAL-JARA, Carlos Augusto; TAFUR-ESCANTA, Paúl Michael; VILLAVICENCIO-POVEDA, Ángelo Homero; GUTIÉRREZ-GUALOTUÑA, Eduardo Roberto. Caracterización del poder calorífico de la biomasa residual de cacao CCN51 mediante procesos de gasificación anaeróbico y termoquímico. **Científica**, Instituto Politécnico Nacional México, v. 22, n. 2, p. 113-123, ago. 2018. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Paul\\_Michael\\_Tafur\\_Escanta/publication/340665505\\_Characterization\\_of\\_th](https://www.researchgate.net/profile/Paul_Michael_Tafur_Escanta/publication/340665505_Characterization_of_th). Acesso em: 15 agosto de 2021.

CHANDRASEKHAR, K.; CAYETANO, Roent Dune A.; MEHREZ, Ikram; KUMAR, Gopalakrishnan; KIM, Sang-Hyoun. Evaluation of the biochemical methane potential of different sorts of Algerian date biomass. **Environmental Technology & Innovation**, [S.L.], v. 20, p. 101180, nov. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eti.2020.101180>.

CHANDRASEKHAR, Sajja S.; VAISHNAVI, D.; SAHU, Nivedita; SRIDHAR, Sundergopal. Design of an integrated membrane bioreactor process for effective and environmentally safe treatment of highly complex coffee industrial effluent. **Journal Of Water Process Engineering**, [S.L.], v. 37, p. 101436, out. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101436>.

CHAPAGAIN, A.K.; HOEKSTRA, A.y.. The water footprint of coffee and tea consumption in the Netherlands. **Ecological Economics**, [S.L.], v. 64, n. 1, p. 109-118, out. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.02.022>.

CHEN, Rong; WEN, Wen; JIANG, Hongyu; LEI, Zhen; LI, Mingzhe; LI, Yu-You. Energy recovery potential of thermophilic high-solids co-digestion of coffee processing wastewater and waste activated sludge by anaerobic membrane bioreactor. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 274, p. 127-133, fev. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2018.11.080>.

CHEN, Rong; JIANG, Hongyu; LI, Yu-You. Caffeine degradation by methanogenesis: efficiency in anaerobic membrane bioreactor and analysis of kinetic behavior. **Chemical Engineering Journal**, [S.L.], v. 334, p. 444-452, fev. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2017.10.052>.

Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira: monitoramento agrícola**. 2. ed. Brasília, Companhia Nacional de

Abastecimento, 2019. 61 f. 5 v. (2318-7913). Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acesso em: 23 jun. 2019.

CRUZ, A. DE A. V. Codigestão de lodo de laticínios e leite de descarte para geração de energia com biogás. **Trabalho de Conclusão**, p. 74, 2019.

DADI, Dessalegn; MENGISTIE, Embialle; TEREFE, Gudina; GETAHUN, Tadesse; HADDIS, Alemayehu; BIRKE, Wondwossen; BEYENE, Abebe; LUIS, Patricia; BRUGGEN, Bart van Der. Assessment of the effluent quality of wet coffee processing wastewater and its influence on downstream water quality. **Ecohydrology & Hydrobiology**, [S.L.], v. 18, n. 2, p. 201-211, abr. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecohyd.2017.10.007>.

DEVI, Rani; SINGH, Vijender; KUMAR, Ashok. COD and BOD reduction from coffee processing wastewater using Avacado peel carbon. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 99, n. 6, p. 1853-1860, abr. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2007.03.039>.

DÍEZ, Hernán E.; GÓMEZ, Ingry Natalia; PÉREZ, Juan F.. Mass, energy, and exergy analysis of the microgasification process in a top-lit updraft reactor: effects of firewood type and forced primary airflow. **Sustainable Energy Technologies And Assessments**, [S.L.], v. 29, p. 82-91, out. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seta.2018.07.003>.

ELHALIS, Hosam; COX, Julian; FRANK, Damian; ZHAO, Jian. The crucial role of yeasts in the wet fermentation of coffee beans and quality. **International Journal Of Food Microbiology**, [S.L.], v. 333, p. 108796, nov. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2020.108796>.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Empresa de Pesquisa Energética (org.). **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2020**: consumo per capita. São Paulo: Empresa de Pesquisa Energética, 2020. 6 slides, color. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>. Acesso em: 15 ago. 2021.

ESCALANTE-HERNÁNDEZ, Humberto; CASTRO-MOLANO, Liliana del Pilar; BESSON, Veronique; JAIMES-ESTÉVEZ, Jaime. Feasibility of the anaerobic digestion of cheese whey in a Plug Flow Reactor (PFR) under local conditions. **Ingeniería, Investigación y Tecnología**, [S.L.], v. 18, n. 3, p. 264-277, 1 jul. 2017. Universidad Nacional Autonoma de Mexico. <http://dx.doi.org/10.22201/fi.25940732e.2017.18n3.024>.

FRANCA, Adriana S.; OLIVEIRA, Leandro S. Coffee. **Integrated Processing Technologies For Food And Agricultural By-Products**, [S.L.], p. 413-438, 2019. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-814138-0.00017-4>.

HADDIS, Alemayehu; DEVI, Rani. Effect of effluent generated from coffee processing plant on the water bodies and human health in its vicinity. **Journal Of Hazardous Materials**, [S.L.], v. 152, n. 1, p. 259-262, 21 mar. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.06.094>.

HAKAWATI, Rawan; SMYTH, Beatrice M.; MCCULLOUGH, Geoffrey; ROSA, Fabio de; ROONEY, David. What is the most energy efficient route for biogas utilization: heat, electricity or transport?. **Applied Energy**, [S.L.], v. 206, p. 1076-1087, nov.

2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.068>.

HALSTEAD, Tony. **Coffee: World Markets and Trade**. United State: United States Department Of Agriculture, 2019. Disponível em: <http://www.fas.usda.gov/data/coffee-world-markets-and-trade>. Acesso em: 30 maio 2019.

HOSEINI, Marziyeh; COCCO, Stefania; CASUCCI, Cristiano; CARDELLI, Valeria; CORTI, Giuseppe. Coffee by-products derived resources. A review. **Biomass And Bioenergy**, [S.L.], v. 148, p. 106009, maio 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106009>.

HUSSAIN, Athar; DUBEY, Shashi Kant. Specific methanogenic activity test for anaerobic degradation of influents. **Applied Water Science**, [S.L.], v. 7, n. 2, p. 535-542, 8 jul. 2015. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s13201-015-0305-z>.

HUSSAIN, Athar; KUMAR, Pradeep; MEHROTRA, Indu. NITROGEN AND PHOSPHORUS REQUIREMENT IN ANAEROBIC PROCESS: a review. **Environmental Engineering And Management Journal**, [S.L.], v. 14, n. 4, p. 769-780, 2015. OAIMDD - EcoZone Publishing House. <http://dx.doi.org/10.30638/eemj.2015.086>.

JIMÉNEZ, J.; GUARDIA-PUEBLA, Y.; ROMERO-ROMERO, O.; CISNEROS-ORTIZ, M.e.; GUERRA, G.; MORGAN-SAGASTUME, J.M.; NOYOLA, A.. Methanogenic activity optimization using the response surface methodology, during the anaerobic co-digestion of agriculture and industrial wastes. Microbial community diversity. **Biomass And Bioenergy**, [S.L.], v. 71, p. 84-97, dez. 2014. Elsevier BV.

JOSÉ CARDOSO SOBRINHO, JADIR NOGUEIRA DA SILVA, ADILIO FLAUZINO DE LACERDA FILHO, JUAREZ DE SOUSA SILVA, Simpósio 1. Viçosa. Custos comparativos de secagem de café usando-se lenha de eucalipto e gás liquefeito de petróleo. Viçosa: **Embrapa**, 2000. Disponível em: [http://www.sapc.embrapa.br/arquivos/consorcio/spcb\\_anais/simposio1/Pos12.pdf](http://www.sapc.embrapa.br/arquivos/consorcio/spcb_anais/simposio1/Pos12.pdf). Acesso em: 08 out. 2020.

KIM, S.H.; HAN, S. K.; SHIN, H. S. Feasibility of biohydrogen production by anaerobic co-digestion of food waste and sewage sludge. **International Journal Of Hydrogen Energy**, [S.L.], v. 29, n. 15, p. 1607-1616, dez. 2004. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.02.018>.

KING, Davidi; CHANDLER, Richardb; CHANDLER, Carlinc; ARCE, Victor Julio chavez; RAUDALES, Raul; TRUBEY, Rich. Measuring and Managing the Environmental Cost of Coffee Production in Latin America. **Conservation And Society**, [S.L.], v. 7, n. 2, p. 141, 2009. Medknow. <http://dx.doi.org/10.4103/0972-4923.58645>. (KING; CHANDLER; CHANDLER; ARCE; RAUDALES; TRUBEY, 2009)

KOTHARI, Richa; PANDEY, A.K.; KUMAR, S.; TYAGI, V.V.; TYAGI, S.K.. Different aspects of dry anaerobic digestion for bio-energy: an overview. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 39, p. 174-195, nov. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.011>.

KULANDAIVELU, Velmourougane; BHAT, Rajeev. Changes in the physico-chemical and biological quality attributes of soil following amendment with untreated coffee

processing wastewater. **European Journal Of Soil Biology**, [S.L.], v. 50, p. 39-43, maio 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejsobi.2011.11.011>.

KULAPICHITR, Fareeya; BOROMPICHAICHARTKUL, Chaleeda; SUPPAVORASATIT, Inthawoot; CADWALLADER, Keith R.. Impact of drying process on chemical composition and key aroma components of Arabica coffee. **Food Chemistry**, [S.L.], v. 291, p. 49-58, set. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.152>.

LABATUT, Rodrigo A.; ANGENENT, Largus T.; SCOTT, Norman R.. Biochemical methane potential and biodegradability of complex organic substrates. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 102, n. 3, p. 2255-2264, fev. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2010.10.035>.

LEE, Eunseok; ROUT, Prangya Ranjan; SHIN, Chungheon; BAE, Jaeho. Effects of sodium hypochlorite concentration on the methanogenic activity in an anaerobic fluidized membrane bioreactor. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 678, p. 85-93, ago. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.396>.

LUZ, Fábio Codignole; CORDINER, Stefano; MANNI, Alessandro; MULONE, Vincenzo; ROCCO, Vittorio. Anaerobic digestion of coffee grounds soluble fraction at laboratory scale: evaluation of the biomethane potential. **Applied Energy**, [S.L.], v. 207, p. 166-175, dez. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.042>.

LUZ, Fábio Codignole; VOLPE, Maurizio; FIORI, Luca; MANNI, Alessandro; CORDINER, Stefano; MULONE, Vincenzo; ROCCO, Vittorio. Spent coffee enhanced biomethane potential via an integrated hydrothermal carbonization-anaerobic digestion process. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 256, p. 102-109, maio 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2018.02.021>.

MARTINEZ, Clara Lisseth Mendoza; SERMYAGINA, Ekaterina; CARNEIRO, Angélica de Cassia Oliveira; VAKKILAINEN, Esa; CARDOSO, Marcelo. Production and characterization of coffee-pine wood residue briquettes as an alternative fuel for local firing systems in Brazil. **Biomass And Bioenergy**, [S.L.], v. 123, p. 70-77, abr. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.02.013>.

MATHERI, Anthony Njuguna; SETHUNYA, Vuiswa Lucia; BELAID, Mohamed; MUZENDA, Edison. Analysis of the biogas productivity from dry anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 81, p. 2328-2334, jan. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.041>.

MERSONI, Cristina; REICHERT, Geraldo Antônio. Comparação de cenários de tratamento de resíduos sólidos urbanos por meio da técnica da Avaliação do Ciclo de Vida: o caso do município de garibaldi, rs. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [S.L.], v. 22, n. 5, p. 863-875, out. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522017150351>.

MIITO, Gilbert John; BANADDA, Noble. A short review on the potential of coffee husk gasification for sustainable energy in Uganda. **F1000Research**, [S.L.], v. 6, p. 1809, 6 out. 2017. F1000 Research Ltd. <http://dx.doi.org/10.12688/f1000research.10969.1>.

NERY, Valéria del; POZZI, Eloisa; DAMIANOVIC, Márcia H.R.Z.; DOMINGUES,

Mércia R.; ZAIAT, Marcelo. Granules characteristics in the vertical profile of a full-scale upflow anaerobic sludge blanket reactor treating poultry slaughterhouse wastewater. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 99, n. 6, p. 2018-2024, abr. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2007.03.019>.

NEU, Anna-Katrin; PLEISSNER, Daniel; MEHLMANN, Kerstin; SCHNEIDER, Roland; PUERTA-QUINTERO, Gloria Inés; VENUS, Joachim. Fermentative utilization of coffee mucilage using *Bacillus coagulans* and investigation of down-stream processing of fermentation broth for optically pure l(+)-lactic acid production. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 211, p. 398-405, jul. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2016.03.122>.

NOVITA, Elida. Biodegradability Simulation of Coffee Wastewater Using Instant Coffee. **Agriculture And Agricultural Science Procedia**, [S.L.], v. 9, p. 217-229, 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aaspro.2016.02.138>.

OWEN, W.F.; STUCKEY, D.C.; HEALY, J.B.; YOUNG, L.y.; MCCARTY, P.L.. Bioassay for monitoring biochemical methane potential and anaerobic toxicity. **Water Research**, [S.L.], v. 13, n. 6, p. 485-492, jan. 1979. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1354\(79\)90043-5](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1354(79)90043-5).

PASSOS, Fabiana; CORDEIRO, Paulo Henrique Miranda; BAETA, Bruno Eduardo Lobo; AQUINO, Sergio Francisco de; PEREZ-ELVIRA, Sara Isabel. Anaerobic co-digestion of coffee husks and microalgal biomass after thermal hydrolysis. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 253, p. 49-54, abr. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2017.12.071>.

PASSOS, Fabiana; ORTEGA, Valentina; DONOSO-BRAVO, Andrés. Thermochemical pretreatment and anaerobic digestion of dairy cow manure: experimental and economic evaluation. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 227, p. 239-246, mar. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2016.12.034>.

PEREIRA, Joale de Carvalho. Programa computacional para dimensionamento de sistemas de geração de energia elétrica a partir do biogás, com aplicação na estação de tratamento de esgotos do baldo/caern: principais características do biogás o. 2018. 104 f. **Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica**, Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018. Cap. 2.

PEREIRA, Lucas Louzada; MOREIRA, Taís Rizzo. **Quality Determinants In Coffee Production**: food science. Washington State University, Pullman, Wa, Usa: Gustavo V. Barbosa-Cánovas, 2021. 443 p. (Food Engineering Series). Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-030-54437-9%0Ahttp://link.springer.com/10.1007/978-3-030-54437-9>. Acesso em: 10 ago. 2021.

PIN, Bruno Vasconcelos da Rosa; BARROS, Regina Mambeli; LORA, Electo Eduardo Silva; OLMO, Oscar Almazan del; SANTOS, Ivan Felipe Silva dos; RIBEIRO, Erui Martuscelli; ROCHA, João Victor de Freitas. Energetic use of biogas from the anaerobic digestion of coffee wastewater in southern Minas Gerais, Brazil. **Renewable Energy**, [S.L.], v. 146, p. 2084-2094, fev. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.004>.

PITHAN, Rosana de Oliveira; BUENO, Carlos Roberto Ferreira; SÁ, Patrícia Blumer Zacarchenco Rodrigues. **Aspectos relativos à produção de soro de leite no**

**brasil, 2007-2016:** produção e importação de lácteos. 2. ed. Sao Paulo: Ctc-Leite, 2017. 47 v. (IE-31/2016). Disponível em: <http://www.iea.sp.gov.br/ftp/iea/ie/2017/tec1-0417.pdf>. Acesso em: 08 nov. 2019.

PÖSCHL, Martina; WARD, Shane; OWENDE, Philip. Evaluation of energy efficiency of various biogas production and utilization pathways. **Applied Energy**, [S.L.], v. 87, n. 11, p. 3305-3321, nov. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.05.011>.

POSMANIK, Roy; KIM, Andrew H.; LABATUT, Rodrigo A.; USACK, Joseph G.; ANGENENT, Largus T.. Granular sludge is a preferable inoculum for the biochemical methane potential assay for two complex substrates. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 309, p. 123359, ago. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123359>.

PUJOL, D.; LIU, C.; GOMINHO, J.; OLIVELLA, M.à.; FIOL, N.; VILLAESCUSA, I.; PEREIRA, H.. The chemical composition of exhausted coffee waste. **Industrial Crops And Products**, [S.L.], v. 50, p. 423-429, out. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.07.056>.

RATTAN, Supriya; PARANDE, A. K.; NAGARAJU, V. D.; GHIWARI, Girish K.. A comprehensive review on utilization of wastewater from coffee processing. **Environmental Science And Pollution Research**, [S.L.], v. 22, n. 9, p. 6461-6472, 20 jan. 2015. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-015-4079-5>.

RIEZE, Jo de. The next frontier of the anaerobic digestion microbiome: from ecology to process control. **Environmental Science And Ecotechnology**, [S.L.], v. 3, p. 100032, jul. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ese.2020.100032>.

Ripley L. E.; Boyle W. C.; Converse J. C. (1986). Improved Alkalimetric monitoring for anaerobic digestion of high –strength wastes. **Water Enviorment Federation**. Water pollution Control federation. 58, 5, 406:411.

SAENGPRAJAK, Arnusorn; KATCHAROEN, Aree; CHOCKUA, Wutthisat; PIAMDEE, Jenjira. Prospective study of application the direct-biogas solid oxide fuel cell system to the biogas plant in Thailand. **Energy Procedia**, [S.L.], v. 158, p. 978-983, fev. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.239>.

SAHANA, M.; SRIKANTHA, H.; MAHESH, S.; SWAMY, M. Mahadeva. Coffee processing industrial wastewater treatment using batch electrochemical coagulation with stainless steel and Fe electrodes and their combinations, and recovery and reuse of sludge. **Water Science And Technology**, [S.L.], v. 78, n. 2, p. 279-289, 3 jul. 2018. IWA Publishing. <http://dx.doi.org/10.2166/wst.2018.297>.

SANTOS, Livia Caroline dos; ADARME, Oscar Fernando Herrera; BAÊTA, Bruno Eduardo Lobo; GURGEL, Leandro Vinicius Alves; AQUINO, Sérgio Francisco de. Production of biogas (methane and hydrogen) from anaerobic digestion of hemicellulosic hydrolysate generated in the oxidative pretreatment of coffee husks. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 263, p. 601-612, set. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2018.05.037>.

SELVAMURUGAN, M.; DORAISAMY, P.; MAHESWARI, M.. An integrated treatment system for coffee processing wastewater using anaerobic and aerobic

process. **Ecological Engineering**, [S.L.], v. 36, n. 12, p. 1686-1690, dez. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2010.07.013>.

SILVA, J. N.; CARDOSO, J. S. HORIZONTAL E VERTICAL DE FLUXOS CRUZADOS. p. 717–723, 2001. Embrapa. Disponível em: <http://www.sapc.embrapa.br/arquivos/consorcio>. Acesso em: 2 jul. 2021.

SILVA, Juarez de Sousa e; DONZELES, Sérgio Maurício Lopes; SOARES, Sammy Fernandes; MORELI, Aldemar Polonini; VITOR, Douglas Gonzaga. **Lavadores e Sistema de Reúso da Água no Preparo do Café**. Brasília: Embrapa, 2014. 4 p. (2317-2029).

SINGH, Akash Deep; UPADHYAY, Apoorva; SHRIVASTAVA, Sandeep; VIVEKANAND, Vivekanand. Life-cycle assessment of sewage sludge-based large-scale biogas plant. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 309, p. 123373, ago. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123373>.

SPEECE, R. E.; PARKIN, G. F. Nutrient requirements for anaerobic digestion. n. June, 2016. **Quality Management**. Researchgate <https://www.researchgate.net/publication/281997494>.

TUCKER, Reginald. Biogas derived from...coffee? **Renewable Energy Focus**, [S.L.], v. 15, n. 5, p. 14-15, set. 2014. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s1755-0084\(14\)70113-9](http://dx.doi.org/10.1016/s1755-0084(14)70113-9).

VEGRO, Celso Luis Rodrigues; CARVALHO, Flavio Condé de. **Disponibilidade e utilização de resíduos gerados no processamento agroindustrial do café: resíduos do processamento na propriedade agrícola e seus usos. Resíduos do processamento na propriedade agrícola e seus usos**. 2012. Disponível em: <http://www.iea.sp.gov.br/ftpiea/ie/1994/tec1-0194.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2020.

WOLDESENBET, A. G.; WOLDEYES, B.; SINGH, B. Characteristics of Wet Coffee Processing Waste and Its Environmental Impact in Ethiopia. **International Journal of Research in Engineering and Science**. v. 2, n. 4, p. 1–5, 2014. <https://www.academia.edu/10135064>.

YANG, Lili; HUANG, Yue; ZHAO, Mingxing; HUANG, Zhenxing; MIAO, Hengfeng; XU, Zhiyang; RUAN, Wenquan. Enhancing biogas generation performance from food wastes by high-solids thermophilic anaerobic digestion: effect of pH adjustment. **International Biodeterioration & Biodegradation**, [S.L.], v. 105, p. 153-159, nov. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.09.005>.

YIN, Changkai; SHEN, Yanwen; ZHU, Nanwen; HUANG, Qiujie; LOU, Ziyang; YUAN, Haiping. Anaerobic digestion of waste activated sludge with incineration bottom ash: enhanced methane production and co2 sequestration. **Applied Energy**, [S.L.], v. 215, p. 503-511, abr. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.056>.

ZHOU, Man; YANG, Hongnan; ZHENG, Dan; PU, Xiaodong; LIU, Yi; WANG, Lan; ZHANG, Yunhong; DENG, Liangwei. Methanogenic activity and microbial communities characteristics in dry and wet anaerobic digestion sludges from swine manure. **Biochemical Engineering Journal**, [S.L.], v. 152, p. 107390, dez. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.bej.2019.107390>.