



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**MÁRCIO JOSÉ BELLIZZI JÚNIOR**

**TRATAMENTO DO LODO E PRODUÇÃO DO BIOSSÓLIDO  
DE FOSSAS VERDES NO SEMIÁRIDO**

**FORTALEZA**

**2022**

MÁRCIO JOSÉ BELLIZZI JÚNIOR

TRATAMENTO DO LODO E PRODUÇÃO DO BIODOSSÍLIDO  
DE FOSSAS VERDES NO SEMIÁRIDO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Suetônio Bastos Mota

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

B384t Bellizzi Jr, Márcio José.  
Tratamento do lodo e produção do biossólido de fossas verdes no semiárido / Márcio José Bellizzi Jr. –  
2022.  
96 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Civil: Saneamento Ambiental, Fortaleza, 2022.  
Orientação: Prof. Dr. Francisco Suetônio Bastos Mota.

1. Lodo Fecal. 2. Saneamento Rural. 3. Resolução CONAMA nº 498/2020. 4. E. coli. 5. Fossa. I. Título.  
CDD 628

---

MÁRCIO JOSÉ BELLIZZI JÚNIOR

TRATAMENTO DO LODO E PRODUÇÃO DO BIODOSSÍLIDO  
DE FOSSAS VERDES NO SEMIÁRIDO

Dissertação apresentada ao  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Civil da Universidade Federal do Ceará, como  
requisito parcial à obtenção do título de Mestre  
em Engenharia Civil. Área de concentração:  
Saneamento Ambiental.

Aprovada em: 28/04/2022.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Francisco Suetônio Bastos Mota (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. José Carlos de Araújo  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Pedro Henrique Augusto Medeiros  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

## AGRADECIMENTOS

Começo por agradecer a todos os seres sagrados deste universo, em especial essa força estranha no ar que, de alguma maneira, possibilitou a vida em todas as suas formas neste planeta.

Agradeço ao Prof. Dr. Suetônio Mota pela excelente orientação nessa pesquisa e pelo auxílio no início de minha vida acadêmica.

Agradeço imensamente ao Prof. Dr. José Carlos de Araújo pelos conselhos acadêmicos precisos e sábios, sempre carregados de paciência e atenção.

Agradeço a todas as pessoas do Assentamento Rural 25 de maio, em especial ao Cleidson, à sua filha Maria (*in memoriam*), ao Adelson e à Sandra da Escola João Sem-Terra. Todos eles desempenharam um papel importante para a realização da pesquisa de campo.

Agradeço ao LABOSAN da UFC e ao Prof. Dr. Fernando José que me auxiliou na análise laboratorial. Aproveito para saudar o companheiro de mestrado José Marcos pelas conversas metodológicas e a Tatiane por compartilhar experiências da sua pesquisa de campo e auxiliar a minha.

Agradeço à Natalia pelo eterno e carinhoso companheirismo.

Agradeço à Pachamama e seus ensinamentos da Terra e do ciclo vida morte vida.

Sou grato também pelo apoio de toda minha família, em especial meus pais, Irani e Márcio, e meu irmão, Marcus.

Agradeço aos amigos, os de longe e os de perto, que sustentaram a amizade mesmo com tanta distância física entre nós.

Por fim, agradeço ao apoio imprescindível da FUNCAP e da Capes, sem os quais dificilmente conseguiria executar a presente pesquisa.

Na história, como na natureza,  
o apodrecimento é o laboratório da vida.

Karl Marx

## RESUMO

A Fossa Verde ou Bacia de Evapotranspiração é uma opção de tratamento do esgoto doméstico que representa uma tecnologia social baseada no saneamento ecológico, de modo a valorizar os recursos naturais do local onde está implantada. Em consonância com o aprimoramento desta tecnologia social, o presente trabalho tem como objetivo avaliar, sob as condições do Semiárido Brasileiro, o processo de higienização do lodo fecal de fossas verdes, através da exposição solar em canteiros de secagem descobertos. Lodos de três fossas foram analisados e tratados de outubro a dezembro de 2020. As fossas, das quais foram extraídas as amostras, foram construídas na zona rural do município de Madalena, Ceará, em 2010 e nunca tinham sido esgotadas até a realização da presente pesquisa, apesar de estarem em pleno funcionamento. Duas das fossas estavam conectadas a residências unifamiliares e uma a um posto de saúde comunitário. As amostras de lodo fecal analisadas apresentaram consistência sólida. O lodo é estável, com razão entre sólidos voláteis e sólidos totais (SV/ST) inferior a 0,40. Em até 45 dias de higienização, nas condições climáticas da estação seca do Semiárido Brasileiro, todas as amostras de lodo fecal haviam atingido o critério microbiológico de *E. coli* menor que 3 log de NMP/g de ST. Portanto, o processo de higienização mostrou-se, para a região de estudo, eficiente para a obtenção de biossólido Classe A, de acordo com a Resolução CONAMA nº 498/2020.

**Palavras-chave:** lodo fecal; saneamento rural; resolução conama nº 498/2020; *E. coli*; fossa.

## ABSTRACT

The green pit or Evapotranspiration tank is an on-site sanitation for domestic sewage. It is a social technology based on ecological sanitation principles, in order to value local natural resources. In line with the improvement of this social technology, the present work aims to evaluate the pathogen reduction of faecal sludge from green pits, through sun exposure in drying beds. Sludge from three green pit were investigated from October to December 2020. The green pit from where the samples were extracted were built in the rural area of the semiarid municipality of Madalena, Ceará, Brazil, in 2010. Since their construction, the green pit had never been emptied until the present investigation. Two of the green pit were connected to one-family homes and one was connected with a communal health center. The analyzed faecal sludge samples showed solid consistency, and can be considered a stable material, with volatile solids to total solids ratio (SV/ST) of less than 0.40. Within 45 days of treatment, under the climatic conditions of the Brazilian Semiarid Region, all faecal sludge samples reached the microbiological criterion for *E. coli* less than 3 log NMP/g ST. In conclusion, the sludge-sanitation process is efficient to reach Class A biosolids standard, for the study region, according to the Brazilian legislation (CONAMA Resolution nº 498/2020).

**Keywords:** faecal sludge; on-site sanitation. conama resolution nº 498/2020; *E. coli*; pit.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Cortes esquemáticos com os principais componentes de uma fossa seca. As Figuras (A) e (B) representam duas possibilidades de desenho.....	19
Figura 2. Esquema de uso agrônômico de lodo fecal acumulado pelo método Arborloo. As Figuras (A) fossa seca com buraco cheio e (B) método Arborloo no buraco cheio com uma nova fossa seca construída ao lado.....	21
Figura 3. Esquema do ciclo de vida da fossa seca alterna (sequência: A, B e C).....	23
Figura 4. Planta e cortes esquemáticos da fossa seca de fermentação tipo Cynamon. A Figura (A) mostra a planta baixa, (B) mostra o corte B-B e (C) mostra o corte C-C. ....	24
Figura 5. Planta baixa (A) e perspectiva esquemáticas (B) da fossa absorvente.....	27
Figura 6. Caixa de transferência para as fossas absorventes .....	28
Figura 7. Esquema geral de fossa séptica de câmara única.....	30
Figura 8. Esquema de fossa séptica de câmara em série .....	31
Figura 9. Esquema de uma Fossa Verde (ou bacia de evapotranspiração). ....	33
Figura 10. Esquema de método alternativo de construção de Fossa Verde usando pneus: (A) corte longitudinal e (B) corte transversal.....	34
Figura 11. Mecanismo de transformação da matéria orgânica durante a estabilização do lodo.....	40
Figura 12. Modalidade de transporte ativo de lodo fecal com destino à estação de tratamento utilizado em países como Quênia e África do Sul.....	44
Figura 13. Esquema representando o processo de adensamento do lodo fecal. ....	46
Figura 14. Principais processos de desaguamento do lodo fecal.....	48
Figura 15. Requisitos de tempo x temperatura para produção de lodo isento de patógenos...	52
Figura 16. Dados sobre descarte de biossólido na Europa em 1985, 1995, 2005 e 2015.....	59
Figura 17. Localização do Assentamento 25 de Maio (A25M) em Madalena, Ceará, onde a presente pesquisa foi realizada. Identificam-se as diversas agrovilas que compõem o assentamento.....	67
Figura 18. Implantação dos canteiros de secagem no Canteiro Experimental da Escola João Sem Terra do Assentamento 25 de Maio, Madalena, Ceará, 2021. ....	68
Figura 19. Esvaziamento manual de uma Fossa Verde no Assentamento 25 de Maio, Madalena, Ceará, 2021.....	69
Figura 20. Esquema dos canteiros de secagem individuais construídos na pesquisa.....	70

Figura 21. Monitoramento dos parâmetros de lodo fecal de uma Fossa Verde em tratamento no Assentamento 25 de Maio, Madalena, Ceará, 2021. ....	71
Figura 22. Aspecto de lodo fecal extraído de uma Fossa Verde com dez anos de uso em Madalena, Ceará, 2021. ....	73
Figura 23. Variação da temperatura de L1 para o período completo de monitoramento. ....	76
Figura 24. Variação da temperatura de L2 para o período completo de monitoramento. ....	76
Figura 25. Variação da temperatura de L3 para o período completo de monitoramento. ....	76
Figura 26. Temperatura dos lodos fecais nos canteiros de secagem no Assentamento 25 de Maio, Madalena, Ceará, 2021. ....	77
Figura 27. Aspecto da consistência do lodo fecal do Posto de Saúde de Paus Branco após 30 dias de higienização. Assentamento 25 de Maio, Madalena, Ceará, 2021. ....	78

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Processos para obtenção de bioossólido Classe A.....	50
Quadro 2. Processos para obtenção de bioossólido Classe B.....	51
Quadro 3. Usos permitidos e suas restrições para Bioossólido Classe A.....	63
Quadro 4. Usos permitidos e suas restrições para Bioossólido Classe B.....	63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Principais parâmetros de lodos fecais, segundo a literatura. ....	37
Tabela 2. Indicadores microbiológicos de lodo de esgoto e fecal .....	42
Tabela 3. Principais destinos dos lodos de esgoto no Brasil e em suas diversas regiões. ....	56
Tabela 4. Valor máximo permitido de diversas substâncias químicas no biossólido, para as Classes 1 e 2, segundo a legislação brasileira CONAMA 498/2020. ....	64
Tabela 5. Parâmetros físico-químicos de três módulos (L1, L2, L3) de lodo fecal de Fossa Verde do Assentamento 25 de Maio, Madalena, Ceará, 2021.....	74
Tabela 6. Parâmetros microbiológicos de três módulos (L1, L2, L3) de lodo fecal de Fossa Verde do Assentamento 25 de Maio, Madalena, Ceará, 2021.....	75
Tabela 7 . Produção de lodo fecal nas fossas verdes abertas e esgotadas no Assentamento 25 de Maio, Madalena, Ceará, 2020. ....	81

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

A	Área superficial do tanque
A25M	Assentamento de Reforma Agrária 25 de Maio
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de Variância
BET	Bacia de Evapotranspiração
C/N	Relação carbono e nitrogênio
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
Cr	Coefficiente de retorno
CTC	Capacidade de Troca de Cátions
DA	Dose de Aplicação
DNA	Ácido desoxirribonucleico
dS/m	deci Siemens por metro
<i>E. coli</i>	<i>Escherichia coli</i>
ETc	Evapotranspiração potencial da cultura
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
ETLF	Estação de Tratamento de Lodos Fecais
FAN	Filtro Biológico Anaeróbio de Fluxo Ascendente
FUNASA	Fundação Nacional de Saúde
FV	Fossa verde
g	Gramma (massa)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IV	Infravermelho
MAPET	Manual Pit Emptying Technology
N	Número de habitantes do domicílio
NBR	Norma Brasileira
Ndisp	Nitrogênio disponível
NMP	Número Máximo Provável
Nrec	Nitrogênio recomendado

°C	Graus Celsius
ONU	Organização das Nações Unidas
PAE	ftalatos
PAH	Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos
PCBs	Policlorinato bifenil
PCDD/Fs	Dibenzodioxinas policloradas e furanos
PFCs	Compostos perfluorados
pH	Potencial Hidrogeniônico
PLANSAB	Plano Nacional de Saneamento Básico
PNSR	Programa Nacional de Saneamento Rural
q	Consumo per capita de água
SESP	Serviço Especial de Saúde
SF/ST	Relação entre Sólidos Fixos e Sólidos Totais
ST	Sólidos Totais
SV/ST	Relação entre sólidos voláteis e sólidos totais
TS-FAN	Associação entre Tanque Séptico e Filtro Anaeróbio
Uc	Uso consuntivo da cultura
UGL	Unidade de Gerenciamento de Lodo
UV	Ultravioleta
WCFV	Wetland Construído de Fluxo Vertical

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>1.1</b>	<b>Hipótese</b> .....	16
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b> .....	16
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo Geral</b> .....	16
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b> .....	17
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	18
<b>2.1</b>	<b>Sistemas de disposição local de excretas e esgotos nas áreas rurais</b> .....	18
<b>2.1.1</b>	<b>Sistemas sem veiculação hídrica</b> .....	18
2.1.1.1	<i>Fossa seca</i> .....	18
2.1.1.2	<i>Fossa seca alterna (compostável)</i> .....	22
2.1.1.3	<i>Fossa seca de fermentação (tipo Cynamon)</i> .....	24
<b>2.1.2</b>	<b>Sistemas com veiculação hídrica</b> .....	25
2.1.2.1	<i>Fossa absorvente (rudimentar)</i> .....	25
2.1.2.2	<i>Fossa séptica (tanque séptico)</i> .....	28
2.1.2.3	<i>Fossa Verde (bacia de evapotranspiração)</i> .....	32
<b>2.2</b>	<b>Produção e caracterização do lodo e do bio sólido</b> .....	36
<b>2.3</b>	<b>Coleta e transporte do lodo</b> .....	43
<b>2.4</b>	<b>Tratamento do lodo</b> .....	45
<b>2.4.1</b>	<b>Adensamento</b> .....	45
<b>2.4.2</b>	<b>Estabilização</b> .....	46
<b>2.4.3</b>	<b>Condicionamento</b> .....	47
<b>2.4.4</b>	<b>Desaguamento</b> .....	48
<b>2.4.5</b>	<b>Higienização</b> .....	49
<b>2.5</b>	<b>Alternativas para a disposição final do lodo e bio sólido</b> .....	55
<b>2.6</b>	<b>Aspectos normativos para o uso agrícola do bio sólido no Brasil</b> .....	61
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	66
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	73
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	82

## 1 INTRODUÇÃO

As estimativas do Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB, 2014) indicam a necessidade de investimento no desenvolvimento do saneamento no país, tendo como meta a universalização dos serviços. Nessa proposta, fossas e tanques sépticos são considerados formas de tratamento individualizado do esgoto, devendo ser inseridas como estratégia de saneamento por municípios e companhias de saneamento, garantindo a retirada sistemática do lodo fecal formado e fazendo o destino correto do mesmo, geralmente em sistemas de tratamento preparados para tal fim. Entretanto, a realidade de comunidades rurais que não estão conectadas aos serviços públicos de saneamento básico é que os próprios moradores são os responsáveis por fazer a construção dos sistemas de tratamento, a retirada do lodo fecal e sua destinação final, arcando também com todos os custos atrelados ao processo como um todo (ANDREOLI; CARVALHO; MEYER, 2015).

Na busca de corrigir o déficit histórico dos serviços de saneamento rural no país, o PLANSAB recomendou a elaboração do Programa Nacional de Saneamento Rural (PNSR) instituindo macrodiretrizes e estratégias para o saneamento rural, incluindo também as comunidades tradicionais (PLANSAB, 2019). O programa tem como objetivo a universalização do acesso ao saneamento básico para áreas rurais através do fomento e execução de ações que garantam a equidade, integralidade, intersetorialidade, sustentabilidade dos serviços implantados, participação e controle social (PNSR, 2019).

Dentro deste contexto a Fossa Verde (FV), também conhecida por tanque de evapotranspiração ou canteiro biosséptico, pode ser vista como uma opção vantajosa ao tratamento do esgoto doméstico, sendo uma das alternativas da Matriz Tecnológicas de Soluções Individuais para Esgotamento Sanitário indicadas no PNSR (2019). Uma publicação anterior (COELHO; REINHARDT; DE ARAÚJO, 2018) reuniu de maneira detalhada a descrição do sistema de FVs como componente de saneamento rural, apresentando a avaliação de 70 unidades instaladas no Semiárido Brasileiro, incluindo teste de qualidade sanitária dos vegetais cultivados nas FVs, uma proposta de dimensionamento para FVs, taxa de acumulação e tempo de retirada do lodo fecal produzido. No âmbito internacional, vale destacar a publicação feita por Paulo *et al.* (2019) na qual é avaliado o desempenho do sistema de Fossa Verde.

Enquanto o termo “lodo de esgoto” é utilizado para designar subprodutos sólidos oriundos de estações de tratamento de esgotos (ETE) (VON SPERLING; ANDREOLI, 2001), o termo “lodo fecal” é atribuído aos resíduos que se acumulam nas soluções individuais para

esgotamento sanitário (STRANDE, 2014). Quando há disponibilidade de condutos forçados na propriedade, as instalações hidráulicas podem ser utilizadas para o esgotamento sanitário. Nesses casos, além das excretas (fezes e urinas) devem ser consideradas as águas residuárias de vasos sanitários (águas pretas), que por vezes se juntam com as águas da pia da cozinha, de lavatórios e chuveiros (águas cinzas) (HU *et al.*, 2016)

Segundo Wijesekara *et al.* (2016), quando estabilizado, o lodo derivado de processos de tratamentos de esgoto pode ser gerenciado com segurança para utilização benéfica dos seus nutrientes e matéria orgânica. Vale ressaltar que um material pode ser considerado estável quando a relação entre os sólidos voláteis e sólidos totais é menor que 0,65 (BRASIL, 2020). Dessa forma, é dado o nome de biossólido ao lodo devidamente estabilizado e que atenda aos critérios microbiológicos e químicos estabelecidos na Resolução nº 498/2020 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), estando apto a ser aplicado em solos. Para Collivignarelli *et al.* (2019), a utilização do termo biossólido valoriza sua utilização produtiva e seus aspectos potencialmente benéficos, contrapondo a simples disposição final improdutiva.

As alternativas mais usuais para a disposição final de lodos e biossólidos são uso agrícola, disposição em aterro sanitário, incineração, reuso industrial, recuperação de solos e áreas degradadas e também aplicação em cultivos florestais (BITTENCOURT; AISSE; SERRAT, 2017). De fato, o biossólido oferece matéria orgânica de grande importância para a sustentabilidade dos solos, além de conter macro e micro nutrientes essenciais para o desenvolvimento das plantas (SHARMA *et al.*, 2017). Em contrapartida, Metcalf e Eddy (2016) apontam que um dos fatores que limita a aplicação do biossólido no solo para uso benéfico é a presença de patógenos, metais pesados e compostos orgânicos tóxicos no mesmo. A avaliação dos constituintes específicos do lodo fecal deve, portanto, ser realizada para devido encaminhamento ao processo de higienização e posterior disposição final.

Nessa perspectiva, a etapa de higienização do lodo é realizada por tecnologias de processamento que têm por objetivo a redução do número de microrganismos patogênicos, obtendo no final um produto seguro e apto para o uso agrícola denominado biossólido. Segundo Pinto (2007), os mecanismos de higienização se inter-relacionam de modo a garantir a produção de um biossólido com nível de patogenicidade adequado previsto nas normativas do país. No Brasil, a legislação específica que define os critérios e procedimentos para produção e disposição final de biossólidos em solos é feita pelo CONAMA, através da Resolução nº 498/2020, que adotou como padrão de controle e garantia da saúde da população duas categorias de qualidade microbiológica para o lodo higienizado: o biossólido Classe A e

o biossólido Classe B.

Na Alternativa 1 dos Processos de Redução de Patógenos descritos pela Resolução CONAMA nº 498/2020, nota-se que, para produção de biossólidos Classe A, é necessário combinar três parâmetros operacionais, que relacionam o tempo de permanência do lodo, de acordo com o teor de sólidos totais (ST) a uma certa temperatura. No que diz respeito ao poder bactericida da radiação solar, o aumento da temperatura causado pelos raios infravermelho faz com que este seja aqui classificado como um mecanismo térmico, enquanto pesquisas apontam que a ação dos raios ultravioletas provoca a inativação de microrganismos patogênicos ao submeter o lodo diretamente à radiação solar (OZDEMIR *et al.*, 2020). De acordo com Borrelly *et al.* (1998), o UV na faixa de 300-400 nm é capaz de realizar a desnaturação do DNA das moléculas por meio de reações fotoquímicas, efetivamente inativando os agentes patogênicos. Vale ressaltar a importância de fazer uso das condições favoráveis existentes no Semiárido Brasileiro, como a grande insolação e a alta temperatura média ambiente, bem como um longo período de estiagem. Tais medidas podem gerar soluções otimizadas no lugar das já consagradas e de alto custo (POMPEO *et al.*, 2016).

Dessa forma, o objetivo do presente trabalho foi verificar o potencial de higienização através da exposição solar em canteiros de secagem descobertos quanto aos níveis de contaminação microbiológica (*E. coli*) de amostras de lodo fecal de fossas verdes no Semiárido Brasileiro, para a produção de biossólido Classe A.

## **1.1 Hipótese**

Este trabalho é baseado na hipótese de que o lodo fecal de fossas verdes não inviabiliza a utilização deste sistema individual de tratamento de esgotos como política pública de saneamento rural no Semiárido Brasileiro, uma vez que, o biossólido obtido através do tratamento do lodo fecal de fossas verdes é um produto que atende aos critérios microbiológicos da Resolução CONAMA nº498/2020 e está, dessa forma, apto para o uso agrícola de forma segura.

## **1.2 Objetivos**

### ***1.2.1 Objetivo Geral***

Avaliar o processo de higienização dos lodos fecais de fossas verdes por exposição solar em canteiros de secagem, durante a estação de estio no semiárido brasileiro, para a produção do biossólido Classe A, de acordo com a Resolução CONAMA nº498/2020.

### ***1.2.2 Objetivos Específicos***

São objetivos específicos da pesquisa:

- a. Caracterizar o lodo fecal e o biossólido de fossas verdes com relação a estabilidade da fração orgânica, consistência e qualidade microbiológica;
- b. Realizar o monitoramento do lodo fecal de fossas verdes para obtenção do biossólido do tipo Classe A, a partir da Alternativa 1 do processo de redução de patógenos da Resolução CONAMA nº498/2020;
- c. Avaliar o tempo necessário, em dias, de exposição solar que o lodo fecal de fossas verdes deve permanecer em canteiros de secagem descoberto para a produção do biossólido Classe A, de acordo com a Resolução CONAMA nº498/2020.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Sistemas de disposição local de excretas e esgotos nas áreas rurais**

#### ***2.1.1 Sistemas sem veiculação hídrica***

Os sistemas sem veiculação hídrica são, geralmente, utilizados em regiões isoladas ou nas quais não há disponibilidade hídrica para esse fim, principalmente nas áreas rurais. A seguir estão elencadas duas das principais soluções secas para esgotamento sanitário individual.

##### ***2.1.1.1 Fossa seca***

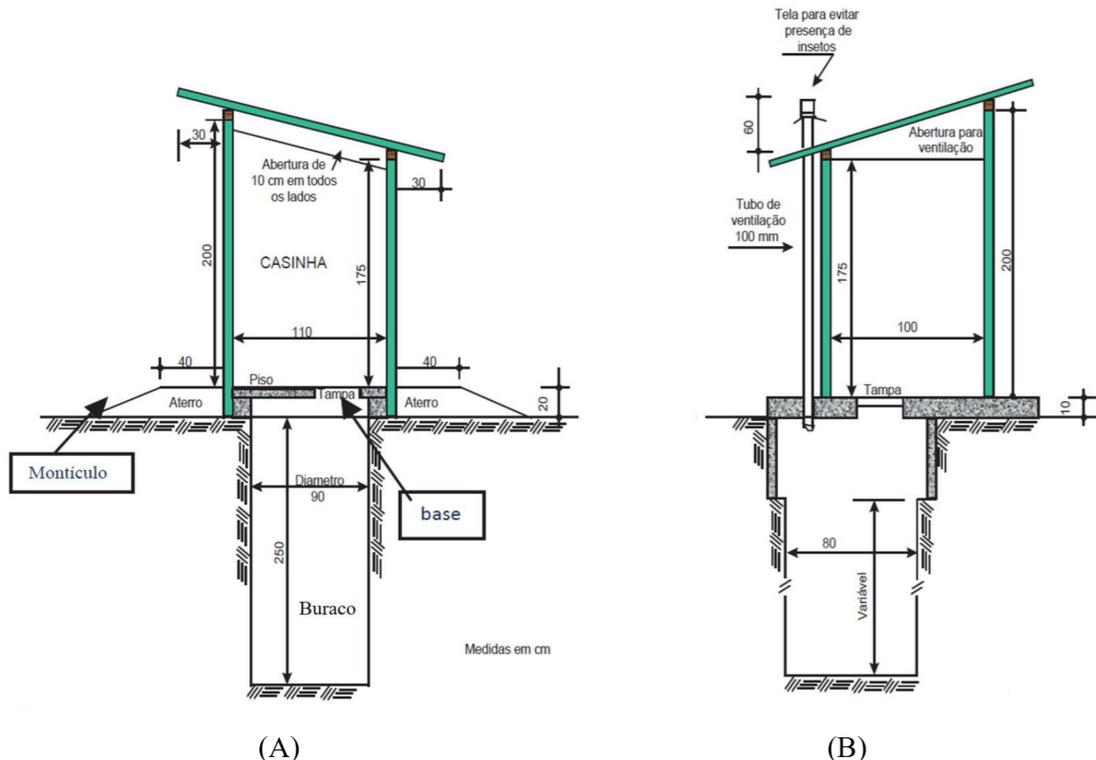
De acordo com a FUNASA (2019), a fossa seca já é considerada um sistema de saneamento satisfatório para residências que não dispõem de instalações sanitárias. Sem dúvida este sistema é uma melhoria em comparação à defecação a céu aberto, podendo ser construída com materiais locais, com reduzidos custo e área de construção.

A fossa seca é constituída por um buraco único escavado no solo, sobre o qual é construída uma “casinha” de proteção para o usuário e para a fossa. Sem utilização de veiculação hídrica, o buraco que recebe as excretas não precisa ser impermeabilizado e pode ser feito de tijolos, madeiras, manilhas de concreto ou outros materiais disponíveis no local, de modo a evitar desmoronamentos (BRASIL, 2019).

Durante o tempo de funcionamento da fossa seca, as excretas retidas no interior do buraco sofrem um processo de digestão anaeróbia, transformando a matéria orgânica em sólidos estáveis, líquidos e gases. O Manual de Saneamento da FUNASA (2019) aponta para a tendência do desenvolvimento de bactérias acidogênicas no início da digestão anaeróbia que são responsáveis pela produção de gases como o sulfídrico, mercaptanas, ácido caprílico, butírico e outros, caracterizados por seus odores ofensivos. Ao longo do processo, no entanto, o aumento do pH propicia o desenvolvimento das bactérias metanogênicas, que produzem gases inodoros (metano e gás carbônico). Vale ressaltar que dentro deste sistema a matéria orgânica é transformada em sólidos estabilizados (ou parcialmente estabilizados), líquidos e gases: o material sólido (lodo fecal) sofre redução de volume e fica armazenado no buraco; o líquido continua seu processo de estabilização ao se infiltrar no solo; e os gases são liberados na atmosfera (BRASIL, 2019).

A indicação da FUNASA é de que a fossa seca seja construída em local livre de enchentes e que seja acessível aos seus usuários. A abertura do buraco no piso deve estar tampada para evitar a proliferação de insetos. É importante ressaltar que ela deve estar distante no mínimo 15m de poços e outras fontes de água, sendo que a cota de fundo do buraco deve se distanciar ao menos 1,5m do lençol freático. No que diz respeito às partes componentes de uma fossa seca, a Figura 1 (A e B) destaca os principais elementos construtivos em dois cortes esquemáticos: casinha, montículo (ou aterro de proteção), base, piso, tubo de ventilação (caso haja) e o buraco escavado no solo.

Figura 1. Cortes esquemáticos com os principais componentes de uma fossa seca. As Figuras (A) e (B) representam duas possibilidades de desenho.



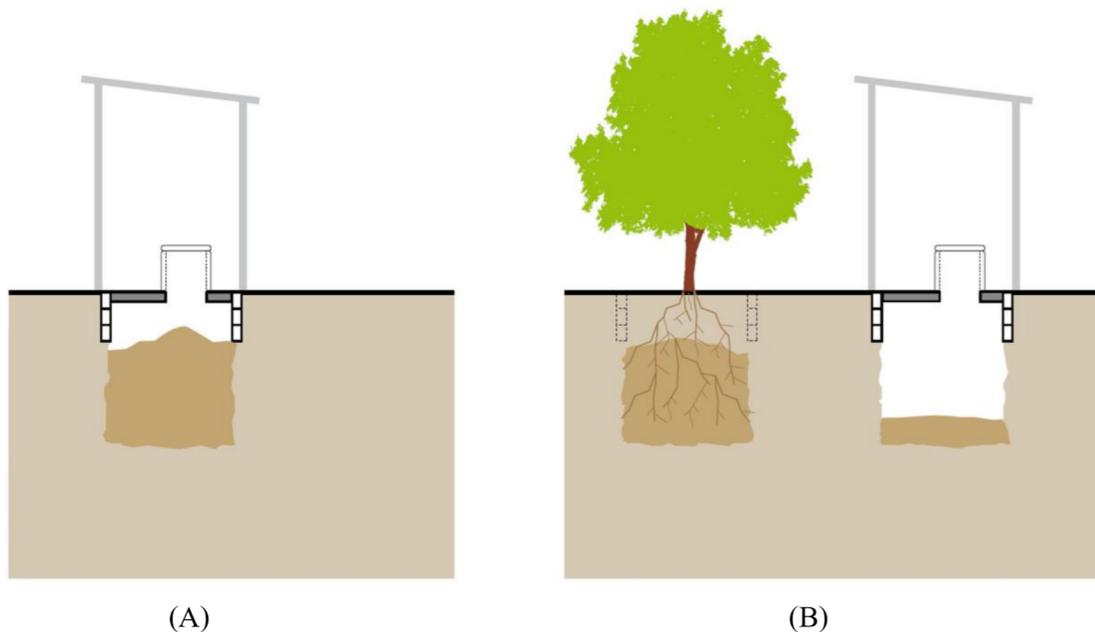
Fonte: Adaptado de Manual de Saneamento, 2019

Para a construção do buraco da fossa seca, é indicada uma abertura quadrada de 80cm de lado ou circular de 90cm de diâmetro, sendo que a profundidade recomendada é 2,50m, mas pode variar de acordo com as características do solo e do nível de água do lençol freático do local. No que diz respeito ao abrigo da fossa seca (casinha), este deve oferecer certo conforto a seu usuário e completar a proteção à fossa seca, geralmente estando condicionado a um custo mínimo. Com o objetivo de evitar o acúmulo de gases no interior da

fossa seca, pode ser inserido um tubo de ventilação ligado diretamente ao buraco, que atravessa a casinha e finaliza aproximadamente 60cm acima do telhado. Vale ressaltar a importância da utilização de uma tela de proteção no final do tubo para evitar a entrada de insetos por ele (BRASIL, 2019).

De acordo com Jordão e Pessoa (2011) a produção de lodo fecal na fossa seca é de 60 litros por habitante por ano. Considerando as dimensões propostas pela FUNASA (2019), a vida útil de uma fossa seca para uma família de cinco pessoas varia de acordo com a destinação do lodo fecal. Caso for ocorrer o esvaziamento do lodo fecal da fossa seca, sua vida útil pode chegar até a cinco anos. Após a retirada do lodo fecal, este deve ser encaminhado para um tratamento complementar, visto que ele é composto por diferentes tempos de decomposição: ainda que haja predominância de matéria orgânica estabilizada, há também excrementos frescos mais recentes, conseqüentemente, não estabilizados e com presença de organismos patogênicos. Se, ao contrário, o buraco for abandonado para a construção de um novo, sua vida útil é de 4 anos, sendo reservados os 50cm superiores do buraco para enchimento com terra. Tilley *et al.* (2014) apontam para uma opção direta de utilização agrônômica do lodo fecal acumulado, denominada de *Arborloo*, que consiste na plantação de uma árvore em cima do buraco da antiga fossa seca, indicando bananeiras, mamoeiros e goiabeiras como as mais adequadas. Esta opção é representada na Figura 2 A com o buraco cheio de lodo fecal, de modo que na Figura 2 B é plantada uma árvore em cima do buraco e construída uma nova fossa ao lado.

Figura 2. Esquema de uso agrônômico de lodo fecal acumulado pelo método *Arborloo*. As Figuras (A) fossa seca com buraco cheio e (B) método *Arborloo* no buraco cheio com uma nova fossa seca construída ao lado



Fonte: Adaptado de Tilley, 2014

Caso não haja tecnologia disponível para fazer a higienização do lodo fecal adequadamente, é preferível a aplicação da *Arborloo* do que o esvaziamento da fossa, visto que ela apresenta um risco mínimo de contaminação do usuário, que praticamente não entra em contato com os patógenos. A *Arborloo* também se mostra preferível ao simples abandono do buraco, mesmo quando devidamente coberto com terra, uma vez que propõe o aproveitamento agrícola dos excrementos, que possuem macronutrientes úteis ao bom desenvolvimento vegetal (TILLEY *et al.*, 2014).

Ainda que a fossa seca seja uma boa alternativa de tratamento simplificado para locais com escassez hídrica, ela apresenta riscos como a contaminação de águas subterrâneas, extravasamentos devido à ação das chuvas e proliferação de insetos. Este sistema de disposição local de excretas sem veiculação hídrica pode ter algumas variações, com algumas alterações no sistema para melhorias no processo. É o caso da fossa seca alterna e da fossa seca de fermentação (Cynamon), ambas descritas a seguir.

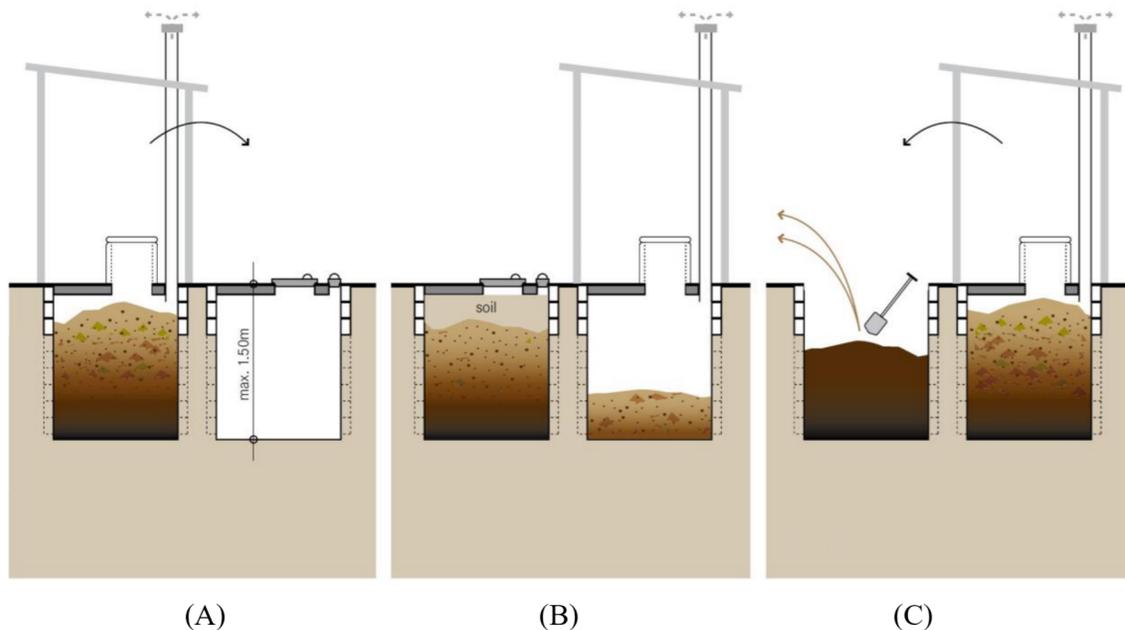
### 2.1.1.2 Fossa seca alterna (compostável)

Neste sistema, o abrigo da fossa também está sobreposto ao buraco não impermeabilizado, mas não apenas a um buraco e sim dois. Como o próprio nome diz, nesta fossa os buracos devem ser usados alternadamente e não simultaneamente, garantindo o tempo necessário para a estabilização da matéria orgânica e consequente redução dos patógenos. Tilley *et al.* (2014) recomendam uma profundidade máxima de 1,5m para cada buraco, sendo essencial o aporte constante de material de cobertura sobre as excretas, como cinzas, folhas e solo: as cinzas auxiliam no controle dos insetos, reduzem os odores e elevam o pH da mistura; as folhas e o solo introduzem uma variedade de organismos que auxiliam o processo de degradação, como minhocas, fungos e bactérias; as folhas também servem como fonte de carbono e como estruturante, que aumenta os poros, propicia condições aeróbias para a biooxidação aeróbia exotérmica (compostagem) do lodo fecal e adequa a relação C/N do processo. Há a possibilidade de inserção de um tubo de ventilação no sistema para reduzir ainda mais os odores e propiciar a saída de CO<sub>2</sub> e entrada de O<sub>2</sub>.

Um buraco da fossa alterna é preenchido em aproximadamente 12 a 24 meses, de acordo com o seu tamanho e o número de usuários. Durante esse período, o substrato orgânico (lodo fecal e agregantes) do buraco cheio é bioestabilizado e humificado, enquanto o outro buraco é utilizado. O biossólido resultante deste processo tem consistência semelhante à terra e pode ser retirado do buraco manualmente para utilização como condicionador de solo, sendo rico em nutrientes, com baixo risco de patogenicidade e não possuindo odores ofensivos (TILLEY, 2014).

A Figura 3 demonstra o ciclo de vida ilimitado que pode ter a fossa seca alterna: quando um dos buracos está cheio de substrato orgânico (Figura 3 A), ele é preenchido com solo e fechado (Figura 3 B); o abrigo da fossa seca alterna é movido para o outro buraco, que passa a ser utilizado (Figura 3 C); quando este estiver cheio, o anterior já finalizou o processo de degradação e pode ser esvaziado para iniciar um novo ciclo.

Figura 3. Esquema do ciclo de vida da fossa seca alterna (sequência: A, B e C)



Fonte: Adaptado de Tilley, 2014

A fossa seca alterna também apresenta riscos de extravasamentos devido à ação das chuvas, mas é uma alternativa mais segura quanto à contaminação de águas subterrâneas, pois seu buraco é mais raso do que uma fossa seca comum, tendo também a redução significativa de moscas e odores. Tilley *et al.* (2014) recomendam cuidados no manuseio do seu bioestabilizado, mas apontam para as vantagens e facilidades no esvaziamento da fossa seca alterna, pois, além de seu buraco ser mais raso, o bioestabilizado é menos compactado.

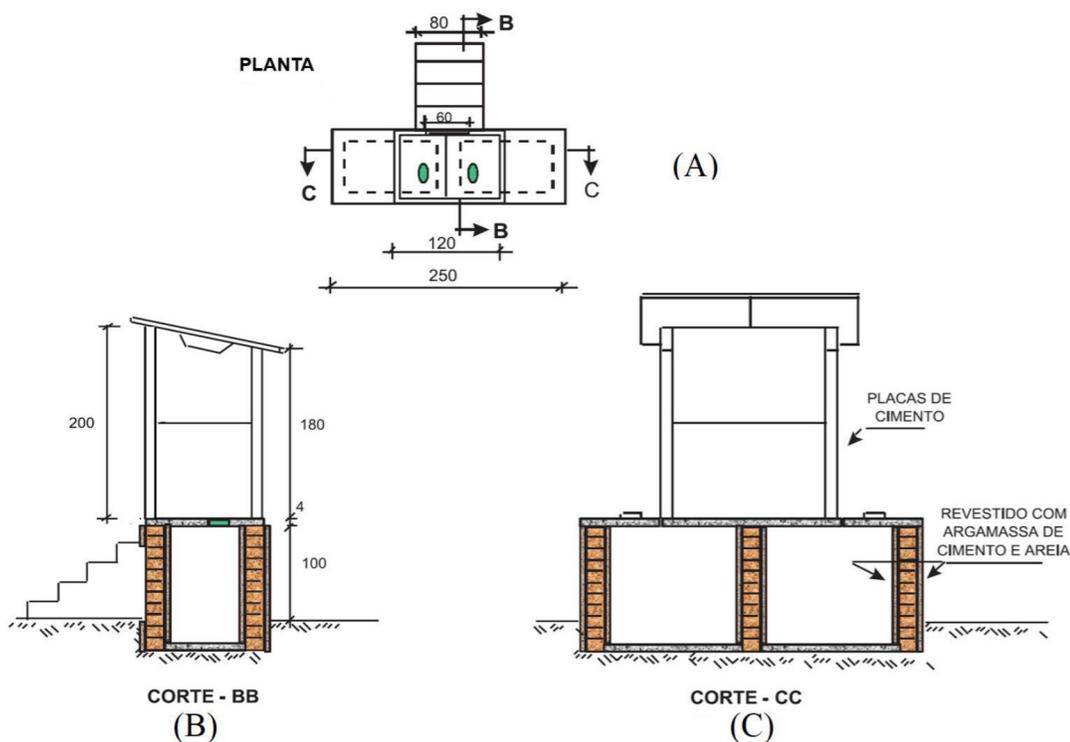
Caso haja disponibilidade de área no local e o esvaziamento do buraco da fossa seca não seja desejado, uma opção alternativa para a utilização do bioestabilizado é a *Arborloo* no buraco (TILLEY, 2014), da mesma forma como descrito anteriormente.

### 2.1.1.3 Fossa seca de fermentação (tipo Cynamon)

Este sistema é constituído por um único abrigo (casinha) sobre dois tanques impermeabilizados e independentes (Figura 4 A), onde ocorre a bioestabilização anaeróbia das excretas, sem utilização de material de cobertura (cinzas, folhas ou solo). Algumas vantagens desta fossa seca é que seus tanques estanques possuem apenas 1m de profundidade (Figura 4 B), podendo ser construídos enterrados, semienterrados ou apoiados na superfície do terreno, de acordo com as características do local de implantação (BRASIL, 2019) e baixa probabilidade de contaminação do lençol freático devido ao tanque ser estanque.

O Manual de Saneamento da FUNASA (2007) descreve o ciclo de funcionamento desta fossa seca: quando a capacidade de um dos tanques estiver esgotada, este deve ser isolado para que o processo de bioestabilização ocorra devidamente; neste momento é utilizado o outro tanque, até que ele também seja preenchido completamente, o que deve ocorrer em aproximadamente 1 ano. Para que este processo ocorra corretamente, é essencial que os dois tanques funcionem sequencialmente e não simultaneamente. A Figura 4 C demonstra uma grande vantagem desta solução frente à fossa seca alterna: a construção do abrigo da fossa sobre ambos os tanques, sem que haja a necessidade de que este seja movido.

Figura 4. Planta e cortes esquemáticos da fossa seca de fermentação tipo Cynamon. A Figura (A) mostra a planta baixa, (B) mostra o corte B-B e (C) mostra o corte C-C.



Fonte: Adaptado de Manual de Saneamento, 2007

Assim como as demais soluções de fossas secas discutidas nesta dissertação, esta também apresenta riscos quanto ao alagamento em épocas de chuva, por isso os tanques devem ser construídos com dispositivos de aterro em torno deles ou de valetas para desvio das águas, de acordo com a implantação da fossa. Se bem construída, a fossa seca Cynamon de tanque duplo é uma solução praticamente definitiva, tendo seu ciclo renovado de acordo com o uso (BRASIL, 2007).

A solução da fossa seca Cynamon foi apresentada pela primeira vez em 1960 durante os cursos de inspetores de saneamento da Fundação SESP com o nome fossa de fermentação. Nos anos de 1963 e 1967 a solução esteve presente no IV Congresso Internacional de Medicina Tropical (Rio de Janeiro) e, respectivamente, na revista de Saúde Pública da Fundação SESP (CYNAMON, 2003). O responsável pelas pesquisas acerca deste tipo de fossa foi o professor Dr. Szachna Eliaz Cynamon e, por isso, a FUNASA detalha esta fossa de fermentação por “tipo Cynamon”.

No que diz respeito à destinação do lodo fecal desta fossa seca, nem o Manual de Saneamento da FUNASA (2007 e 2019) nem a obra do professor Cynamon (2003) indicam qual a destinação adequada após a retirada do material. Na ausência de indicações baseadas em comprovações científicas, a higienização do lodo fecal deverá ser feita para garantir a utilização do material sem risco à saúde humana e animal.

### **2.1.2 Sistemas com veiculação hídrica**

Quando há disponibilidade hídrica na propriedade, as instalações hidráulicas podem ser utilizadas para o esgotamento sanitário. Nestes casos, além das excretas (fezes e urinas) devem ser consideradas as águas residuárias de vasos sanitários (águas pretas), que por vezes se juntam com as águas da pia da cozinha e de lavatórios e chuveiros (águas cinzas) (HU *et al.*, 2016).

#### **2.1.2.1 Fossa absorvente (rudimentar)**

As fossas absorventes também são denominadas de fossas rudimentares segundo o IBGE (2013), conhecidas popularmente como fossas caipiras, fossas negras ou fossas simples. É importante ressaltar que nesta dissertação não será utilizado o termo fossa negra ou águas negras por serem considerados termos pejorativos ao aludir raça e não cor à classificação, podendo ser ofensivo a uma parcela da população.

Devido à sua simplicidade construtiva, baixo custo e desconhecimento de

alternativas, esta é a fossa mais usual nas regiões rurais brasileiras (MARTINETTI; TEIXEIRA; SHIMBO, 2009). A fossa absorvente consiste em uma escavação no solo semelhante a um poço, para onde são encaminhadas as águas pretas e/ou cinzas, podendo ter ou não paredes de sustentação, de acordo com as características do solo. Para sua sustentação vertical podem ser utilizados anéis de concreto, alvenaria de tijolo e outros materiais, contanto que haja aberturas que permitam a infiltração dos efluentes no solo. Essa fossa pode ter formato retangular ou cilíndrico, não possui revestimento no fundo, para facilitar a infiltração do efluente, sendo devidamente coberta com laje de concreto armado, ferrocimento ou outro material que garanta a segurança (HARTMANN *et al.*, 2009).

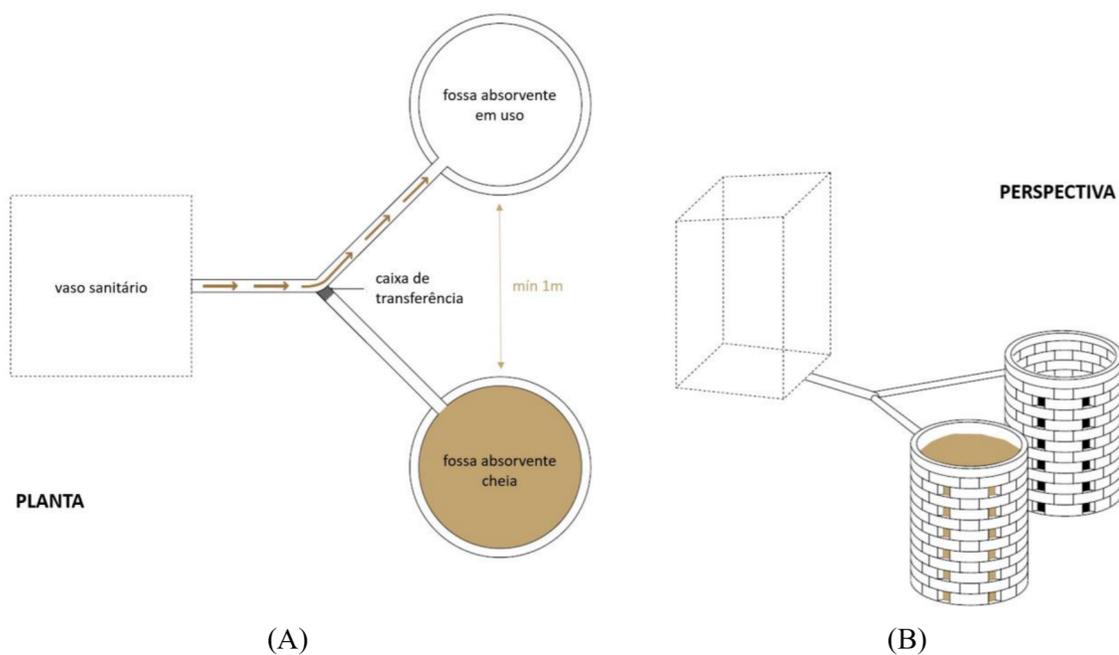
Este tipo de unidade de tratamento responde pelas funções desempenhadas pelo tanque séptico e pelo sumidouro. Dessa forma, nota-se que a colmatação do solo ocorre em menor tempo do que nos sumidouros construídos pós-tanques sépticos, devido à maior quantidade de sólidos em suspensão, originários da matéria orgânica em processo de digestão, acumulados em seu interior. Conforme seja verificada a perda da capacidade de infiltração no solo, com o completo enchimento da fossa absorvente, o Manual de Saneamento da FUNASA (2019) indica a construção de uma nova fossa absorvente para assumir a função desta.

Em 1985 David Duncan Mara publicou um documento técnico em associação com a ONU e o Banco Mundial, contendo recomendações acerca do projeto e construção de fossas absorventes para países em desenvolvimento. A construção de uma única fossa absorvente é apropriado para locais onde haja a disponibilidade e acesso de caminhão limpa-fossa, seja em áreas rurais ou urbanas. Quando, por outro lado, não há essa possibilidade, o recomendado é que sejam construídas duas fossas absorventes para o mesmo sistema, de modo que haja o uso alternado entre elas: enquanto uma das fossas é utilizada, a outra passa pelo processo de bioestabilização para se tornar um bioestabilizado, que pode ser escavado manualmente. De acordo com Mara (1985) este é um processo que leva no mínimo um ano para acontecer. Já Tilley *et al.* (2014) recomendam o período de dois anos para alternância das fossas absorventes. Estes tempos são previstos como o período suficiente para a eliminação de vírus, bactérias e protozoários, sendo que dos helmintos apenas os *Ascaris* continuarão com alguns ovos viáveis (MARA, 1985).

De acordo com os autores citados, as fossas devem ser projetadas e dimensionadas para armazenar, digerir e infiltrar as águas pretas e/ou cinzas durante o período de um a dois anos. Como pode ser visto na Figura 5 B, ambas as fossas têm formato circular e paredes em prumo, a distância recomendada entre ambas as fossas deve ser de no mínimo 1m para minimizar a contaminação cruzada entre elas (Figura 5 A). Também é importante que

elas sejam construídas a uma distância mínima de 1m de qualquer fundação, para evitar impactos estruturais (TILLEY *et al.*, 2014).

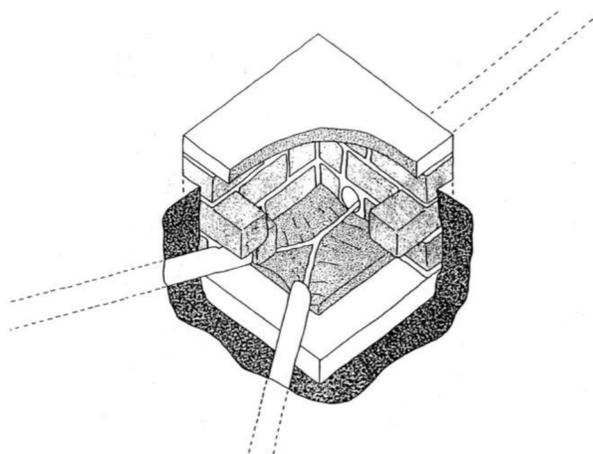
Figura 5. Planta baixa (A) e perspectiva esquemáticas (B) da fossa absorvente.



Fonte: Adaptado de Tilley, 2014

Para garantir que ocorra a alternância entre as fossas, se faz necessário o uso de algum tipo de dispositivo para transferência do fluxo. Isso pode ocorrer de diversas maneiras, como com a simples interrupção da tubulação de entrada na fossa cheia com argamassa, tijolo ou outros; podem também ser instalados registros hidráulicos em ambas as fossas; mas Mara (1985) indica a construção de uma caixa de transferência do fluxo, que também funciona como caixa de inspeção, ilustrada na Figura 6.

Figura 6. Caixa de transferência para as fossas absorventes



Fonte: Mara, 1985

Este é um sistema que não possui aceitação unânime, mesmo sendo a mais usual nas zonas rurais brasileiras. Ela é considerada como uma forma de atendimento precário pelo Programa Nacional de Saneamento Rural – PNSR de 2019 e pelo IBGE (2013), que classifica como situação de déficit os domicílios servidos de fossa absorvente ou rudimentar. Isso se deve ao seu potencial de contaminação de aquíferos e mananciais por nitrato, podendo ter um impacto ambiental negativo para a saúde animal e humana, como a metaemoglobinemia em lactantes e alguns tipos de câncer (OLIVEIRA; VON SPERLING, 2011). Por outro lado, a fossa absorvente também é considerada como uma forma adequada de tratamento e disposição final do esgoto no âmbito nacional (FUNASA, 2019) e internacional (WHO/UNICEF, 2017). Esta perspectiva se sustenta na separação higiênica entre as pessoas e suas excretas, que resolve satisfatoriamente aspectos de saúde pública (FIGUEIREDO *et al.*, 2019).

#### 2.1.2.2 Fossa séptica (tanque séptico)

Jean Louis Mouras criou a fossa séptica ao observar o comportamento dos sólidos acumulados em um tanque de alvenaria (correspondente a uma caixa de gordura) que havia construído para reter os sólidos do esgoto da cozinha (água cinza escura) antes de despejar na fossa absorvente da sua residência. De fato, o volume dos sólidos acumulados em 12 anos na sua caixa de gordura estava muito abaixo do que o esperado e, com suporte nas descobertas de Pasteur, Mouras atribuiu essa redução do volume à atividade bacteriana que, em condições anaeróbias, produzia liquefação e gaseificação dos sólidos orgânicos (ANDRADE NETO, 1997).

No Brasil, a partir de 1963 a ABNT passou a orientar a utilização das fossas sépticas com uma sequência de normas que buscam contemplar tanto sua construção e instalação, como também o pós-tratamento e a disposição final dos efluentes líquidos:

NBR 7229/1963 – Norma para a construção e instalação de fossas sépticas

NBR 7229/1982 – Construção e instalação de fossas sépticas e disposição dos efluentes finais

NBR 7229/1993 – Projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos

NBR 13969/1997 – Tanques sépticos – Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos – Projeto, construção e operação

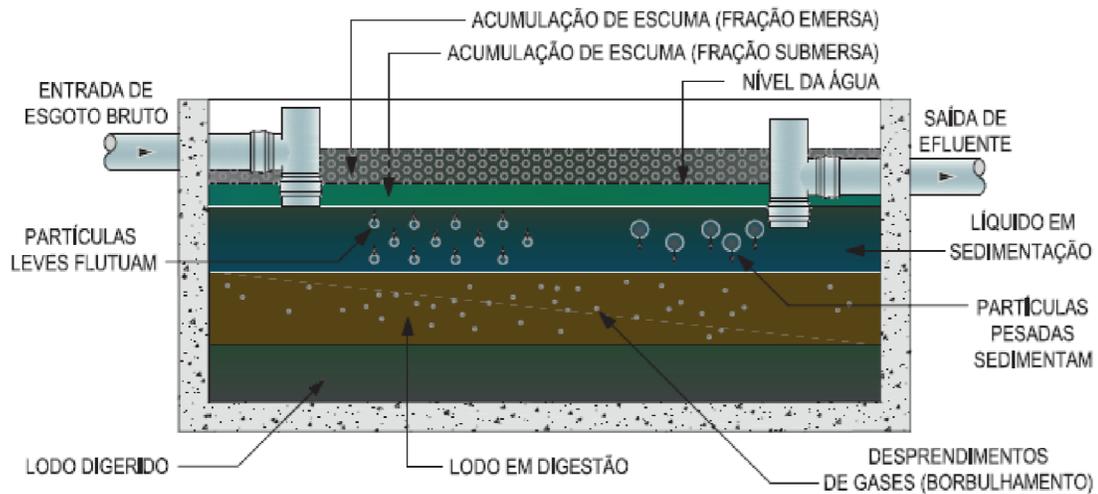
Andrade Neto, em 1997, apontou para a previsão de outra norma que abordaria o tratamento e disposição dos lodos de tanques sépticos que, no entanto, ainda não foi elaborada.

O histórico da fossa séptica e sua relevância dentro de um órgão de normalização técnica como a ABNT é um reflexo da ampla utilização desta solução, sendo descrita por Andrade Neto (1997) como a mais extensivamente empregada em todos os países.

A fossa séptica é projetada para receber esgotos domésticos (águas pretas, cinzas, cinzas escuras e amarelas) em um tanque estanque cilíndrico ou prismático retangular. A entrada do esgoto e saída do seu efluente ocorre pela parte superior do tanque, através da utilização de dispositivos, como tês ou septos, que evitam a turbulência, curto circuito e a reter a espuma no seu interior (ABNT 7229, 1993).

O funcionamento geral da fossa séptica é ilustrado na Figura 7 e reúne os objetivos dos decantadores e digestores, uma vez que nela ocorrem simultaneamente os processos de: decantação, sedimentação e flotação dos sólidos das águas residuárias, bem como a degradação e digestão do lodo e da espuma.

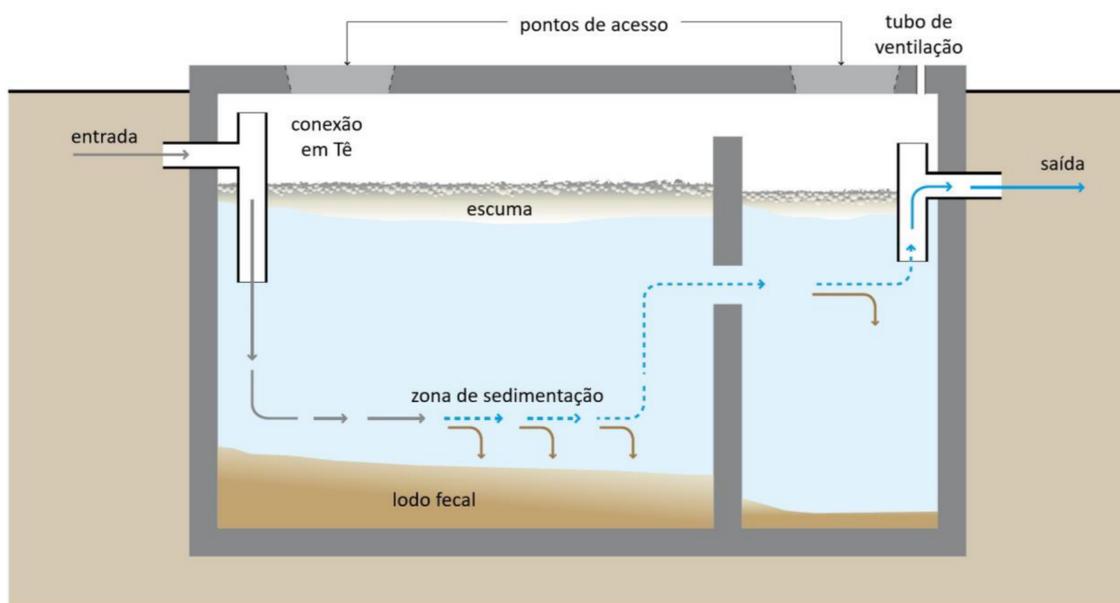
Figura 7. Esquema geral de fossa séptica de câmara única



Fonte: Manual de Saneamento, 2019

As fossas sépticas podem ser de câmara única ou câmara em série, sendo a primeira opção ilustrada pela Figura 7, na qual todos os processos citados ocorrem em um único ambiente. No caso das fossas sépticas de câmara em série, o tanque é dividido por paredes internas janeladas, vazadas a 2/3 da sua altura útil, que o dividem em duas ou mais câmaras em série no sentido do fluxo horizontal. Esta opção é representada na Figura 8, onde se observa que a sequência de câmaras permite um acúmulo maior de lodo na primeira câmara, seguido por uma sedimentação mais tranquila dos sólidos suspensos na segunda câmara, que acumula menor volume e propicia a saída de efluente mais clarificado em comparação a uma fossa séptica de câmara simples.

Figura 8. Esquema de fossa séptica de câmara em série



Fonte: Adaptado de Tilley, 2014

Uma vez que há a produção de um efluente na fossa séptica, para que ela funcione como sistema de tratamento dos esgotos domésticos é necessário projetar um conjunto de unidades para o tratamento e disposição final do efluente, lodo sedimentado e escuma (ABNT 7229, 1993; MOTA, 2016).

Tendo isso em vista, o tratamento preliminar do afluente é realizado pela fossa séptica, no entanto, é importante ressaltar que o seu efluente ainda contém sólidos suspensos e dissolvidos, nutrientes e organismos patogênicos. Dependendo do nível de exigência do órgão fiscalizador e para garantir efetiva proteção do manancial hídrico, é necessário prever um tratamento complementar antes da disposição final do efluente da fossa séptica. A NBR 13969/1997 normaliza como opção de pós-tratamento as seguintes unidades: filtro anaeróbio de fluxo ascendente, filtro aeróbio submerso, lodo ativado por batelada, vala de filtração, filtro de areia e desinfecção. Já no que diz respeito à disposição final do efluente líquido, a mesma norma indica as alternativas seguintes: vala de infiltração, canteiro de infiltração / evapotranspiração, galeria de águas pluviais, corpos de água, sumidouro e reúso. De acordo com Andrade Neto (1997), o tanque séptico (TS) sucedido pelo filtro biológico anaeróbio de fluxo ascendente (FAN) é a associação mais comum para o polimento dos efluentes, podendo também ser denominado de sistema TS-FAN.

Com relação ao efluente sólido (lodo) da fossa séptica, é essencial a remoção do lodo num intervalo previsto, que pode levar meses ou anos, de acordo com as definições do

projeto. Dentre as formas para realizar o esgotamento do lodo estão o bombeamento com caminhão limpa-fossa, sucção, sifonamento ou descarga por pressão hidrostática. É importante salientar que essa operação não pode ser negligenciada, pois caso não seja realizada a limpeza no tempo previsto, o espaço destinado à decantação dos sólidos suspensos ficará ocupado pelo lodo acumulado e a fossa séptica não terá eficácia no tratamento das águas residuárias. A ausência de limpeza do lodo também acarretará em impactos negativos nas unidades a jusante, como o sumidouro ou vala de infiltração, uma vez que a elevada concentração de sólidos suspensos no efluente pode colmatar o solo e os meios filtrantes (HARTMANN *et al.*, 2009).

A NBR 7229/1993 sugere o digestor, leito de secagem ou estação de tratamento de esgoto para o tratamento complementar do lodo; e o aterro sanitário e campo agrícola para a disposição final. Esta norma indica que no caso de comunidades isoladas deve ser prevista a implantação de leitos de secagem para o tratamento complementar com retorno dos efluentes do leito de secagem para a fossa séptica. Após o desaguamento, a disposição final do lodo seco pode ocorrer em campo agrícola sendo, porém, vetado seu uso para hortaliças, frutas rasteiras e legumes consumidos crus. Ainda que haja as indicações citadas, a ABNT não especifica os aspectos de projeto, construção e operação para o tratamento complementar do lodo, tendo anunciado em 1997 a elaboração de uma norma que preencherá esta lacuna, a ser intitulada “Tratamento e disposição final de sólidos do sistema de tanque séptico”, que infelizmente não foi concluída.

Como dito anteriormente a norma para o tratamento e disposição de sólidos da fossa séptica não teve sua publicação realizada ainda, mas tanto a NBR7229 como a NBR 13969 tem um fluxograma com o intuito de instruir o projeto de forma completa, constituindo um sistema, pois o intervalo de tempo para a retirada do lodo sedimentado é um parâmetro de projeto e dessa forma sempre terá uma saída de efluente sólido.

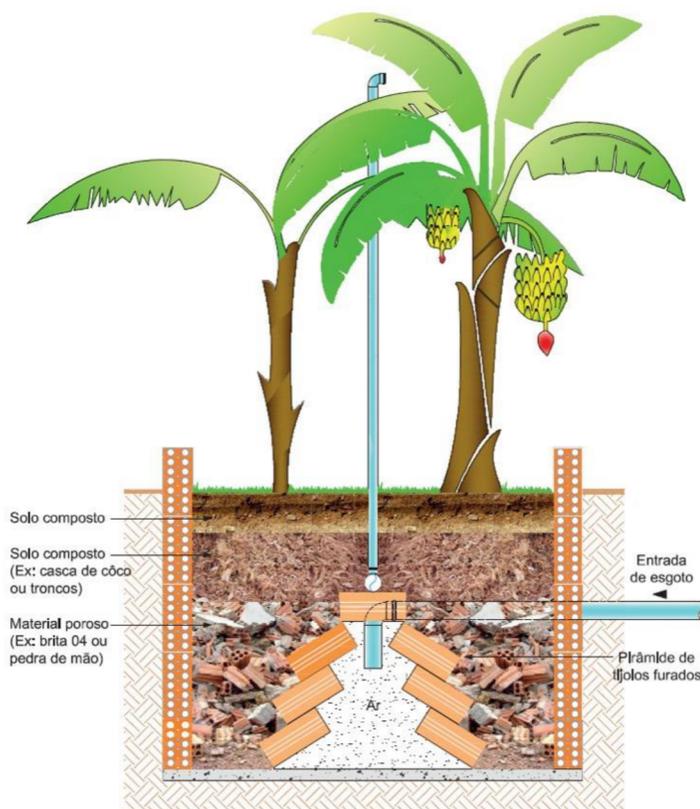
### 2.1.2.3 Fossa Verde (*bacia de evapotranspiração*)

Tom Watson desenvolveu a proposta da Fossa Verde para receber e tratar o esgoto, em substituição ao então usual tanque séptico com vala de infiltração, por isso o sistema ficou conhecido internacionalmente como *Watson Wick* (JENKINS, 2005). Segundo Figueiredo, Santos e Tonetti (2018), no Brasil esta tecnologia passou a ser divulgada no início dos anos 2000, tendo ganhado maior visibilidade no campo da permacultura. De acordo com os mesmos autores, a Fossa Verde é também conhecida por ecofossa, fossa bioséptica, fossa de bananeira, canteiro bio-séptico e bacia de evapotranspiração (BET), consistindo em um

tanque impermeável com três partes principais: câmara de digestão, camada com diferentes materiais filtrantes e, por fim, uma área plantada com espécies vegetais.

Primeiramente a água residuária é encaminhada para a câmara de digestão, uma estrutura interna em formato de pirâmide permeável, geralmente feita de tijolos cerâmicos furados (Figura 9) ou de pneus espaçados (Figura 10), onde se inicia o processo de digestão anaeróbia das fases líquida e sólida, propiciando que os sólidos se decantem e formem o lodo fecal. Por ser formada por uma estrutura permeável, o efluente escoo da câmara de digestão para a camada inferior de materiais porosos, que dá suporte para a formação de biofilme e funciona como filtro anaeróbio de fluxo ascendente (PAULO *et al.*, 2013).

Figura 9. Esquema de uma Fossa Verde (ou bacia de evapotranspiração).

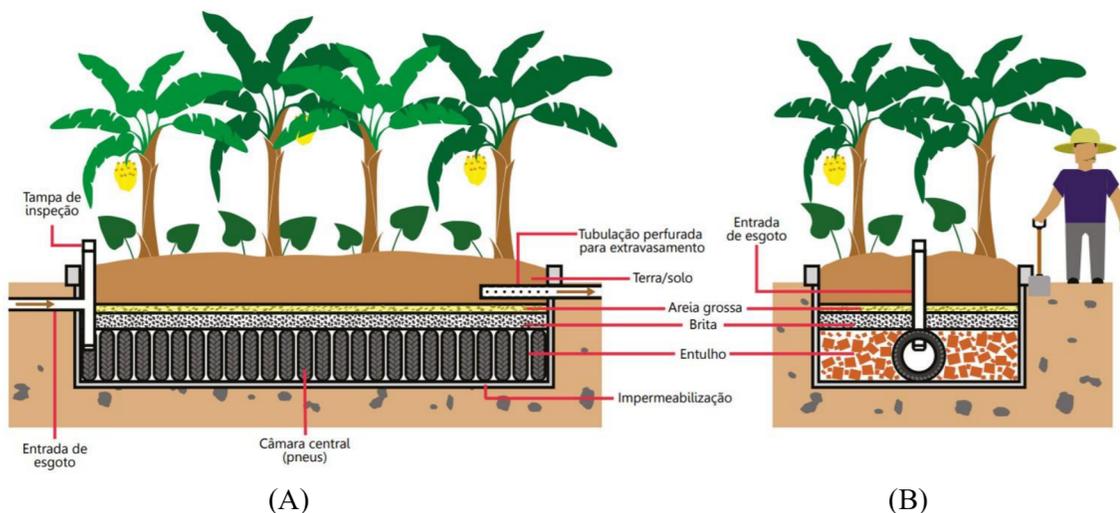


Fonte: Funasa, 2019

À medida em que o efluente ascende por capilaridade para a superfície do sistema, a degradação da matéria orgânica que antes ocorria em meio anaeróbio passa a ser feita em meio aeróbio na zona de raízes das plantas da Fossa Verde. Este processo propicia a reação de nitrificação dos compostos orgânicos que gera a forma de nitrato, assimilável pelas plantas (GALBIATTI, 2009). Pamplona e Venturi (2004) ressaltam que uma grande vantagem desta

tecnologia é a reciclagem da água através da evapotranspiração e dos nutrientes através da produção de biomassa e de alimentos, sendo muito comum o plantio de bananas, mamoeiros, taiobas e outros na camada superior das fossas verdes.

Figura 10. Esquema de método alternativo de construção de Fossa Verde usando pneus: (A) corte longitudinal e (B) corte transversal.



Fonte: Tonetti *et al.*, 2018

Tratando-se de um sistema fechado, a Fossa Verde não produz efluente final. Não há um consenso sobre o uso de um tubo de extravasamento já que o sistema é dimensionado para que o solo superficial da Fossa Verde trabalhe sempre em condições não saturadas e evapotranspire toda a água. No entanto, muitos recomendam o uso do tubo de extravasamento para uma eventual sobrecarga no sistema e para drenar a água da chuva, encaminhando a tubulação para um círculo de bananeiras ou um sumidouro (FUNASA, 2018; TONETTI *et al.*, 2018). O plantio e manejo das espécies vegetais das fossas verdes têm papel fundamental no sistema, sendo que a pesquisa de Coelho (2013) relatou extravasamento de efluente justamente nas unidades sem plantio ou sem manejo das bananeiras.

No que diz respeito ao dimensionamento, o Catálogo de Soluções Sustentáveis de Saneamento (FUNASA, 2018) e Paulo *et al.* (2013) sugerem a utilização da profundidade para a Fossa Verde entre 1,0 m a 1,2 m e indicam uma área de 2,0 m<sup>2</sup> por habitante. Já Oliveira Netto *et al.* (2015) trabalharam com um dimensionamento adaptando as diretrizes da NBR 7229/1993 (fossa séptica) para fossas verdes implantadas em comunidades rurais no sertão de Alagoas, chegando a unidades com dimensões de 2,0m x 1,0m x 1,7m (comprimento x largura x profundidade) e volume útil de 3,4 m<sup>3</sup> para residências de cinco moradores. De

maneira mais sistêmica, Coelho, Reinhardt e de Araújo (2018) propõe um dimensionamento tendo como base a análise do balanço hídrico do local onde a Fossa Verde será implantada (Equação 1) para obter a área do sistema, utilizando a profundidade de 1,0 m como padrão (Coelho, Reinhardt e de Araújo (2018)).

$$A = \frac{q.N.C_r}{(ET_C + U_C)} \quad (1)$$

Na Equação 1, A é a área superficial do tanque (m<sup>2</sup>); q é o consumo *per capita* de água (m<sup>3</sup>.hab<sup>-1</sup>.dia<sup>-1</sup>); N é o número de habitantes do domicílio (hab); C<sub>r</sub> é o coeficiente de retorno (adimensional); ET<sub>C</sub> é a evapotranspiração potencial da cultura (m.dia<sup>-1</sup>); e U<sub>C</sub> é o uso consuntivo da cultura (m.dia<sup>-1</sup>). Coelho, Reinhardt e de Araújo (2018) também elaboram uma proposta acerca da taxa de acumulação do lodo das fossas verdes, estimando a periodicidade de manutenção do mesmo e indicando a necessidade de o fazer. A publicação destes autores reforça a preocupação em relação ao acúmulo de lodo, sendo que algumas publicações sugerem a retirada do lodo das fossas verdes para sua manutenção a longo prazo (PAULO *et al.*, 2013; FUNASA, 2014), enquanto outras publicações apontam a ação como uma possibilidade (TONETTI *et al.*, 2018). De fato, este é um assunto que não encontra consenso na literatura, uma vez que o Catálogo de Soluções Sustentáveis de Saneamento da FUNASA (2018) cita não ser necessária a remoção do lodo digerido acumulado. A esta discussão, vale acrescentar que Campos *et al.*, (2009) e também Von Sperling e Gonçalves (2001) afirmam que a geração de lodo é inerente ao tratamento biológico de esgoto, qualquer que seja o sistema utilizado.

Dentro da perspectiva apresentada, a Fossa Verde deve ser considerada como um sistema 2 em 1, que associa o tratamento primário com o destino final do efluente (evapotranspiração). Enquanto a câmara de digestão recebe as águas residuárias e realiza o tratamento das mesmas, seu efluente é destinado aos materiais filtrantes, que fazem o polimento e propiciam a ascensão do mesmo para que as plantas realizem o processo de evapotranspiração e absorção dos nutrientes, que passam a ser incorporados na biomassa.

Paulo *et al.* (2013) ressaltam a escassez de publicações científicas disponíveis sobre as fossas verdes, indicando como uma tecnologia comparável, na literatura internacional, que são denominadas de, *willow wetlands*, *willow systems*, *willow beds*, *zero-discharge wetlands*, *Zero Liquid Discharge-ZLD* (Kadlec; Wallace, 2009; Dotro *et al.*, 2017; Frédette; Comeau; Brisson, 2022), que utiliza o efluente de fossas sépticas, ou outro tipo de

tratamento primário, através do processo de evaporação, transpiração e absorção de nutrientes através das plantas de rápido crescimento e alta taxa de  $ET_c$ , sendo a *Willow* (*Salix viminalis* L.) com idade mínima de 1 ano a mais comumente utilizada. Os sistemas *Willow* foram desenvolvidos e implementados principalmente na Dinamarca (Gregersen; Brix, 2001; Brix; Arias, 2005, 2011; Arias, 2012) e na Irlanda (Curneen; Gill, 2013, 2016). Como pode ser observado pelos países citados anteriormente que fazem uso dessa tecnologia, não é necessário um balanço hídrico negativo para que o sistema funcione adequadamente (Dotro *et al.*, 2017).

Dessa forma as principais diferenças entre a Fossa Verde e o sistema Willow é a câmara de digestão (ausente no sistema Willow), o tipo de planta utilizado e o tipo de efluente. No entanto, mesmo com as diferenças elencadas, ambos os sistemas se assemelham pela utilização da evapotranspiração e reciclagem de nutrientes, como forma de reúso e não geração de efluentes (PAULO *et al.*, 2013, 2019).

## **2.2 Produção e caracterização do lodo e do biossólido**

Enquanto o termo “lodo de esgoto” é utilizado para designar subprodutos sólidos oriundos do tratamento de esgotos em ETes (VON SPERLING; ANDREOLI, 2001), o termo “lodo fecal” é atribuído aos resíduos que se acumulam nos sistemas de saneamento local (STRANDE, 2014). Dependendo do tipo de tecnologia utilizada (com ou sem veiculação hídrica), o lodo fecal pode ser composto por excrementos e outros materiais, como produtos de limpeza e de higiene, água de descarga, águas cinzas e eventuais resíduos sólidos. Dessa forma, o volume produzido e acumulado de lodo fecal pode ser tão variável quanto suas características (STRANDE; VELKUSHANOVA; BRDJANOVIC, 2021). Mesmo com tamanha variabilidade, a gestão do lodo fecal exige um conhecimento prévio quanto a alguns fatores que interferem na quantidade e composição deste resíduo. De acordo com Velkushanova e Strande (2021) e com Souza *et al.* (2015), os principais fatores são:

- a) Fator demográfico: número de usuários, frequência de uso, rural, urbano, residencial uni ou multifamiliar, mista, comercial, serviço, hospedagem, saúde ou outra;
- b) Fator técnico: tipo de sistema de disposição local de excretas e esgotos, frequência entre limpezas;
- c) Fator ambiental: temperatura, clima, nível do lençol freático e topografia.

Além destes, os autores ressaltam ainda que a variação de composição do lodo de fossas depende também do clima do local, hábitos alimentares e de limpeza dos usuários,

existência de caixa de gordura antes da fossa, entre outros (SOUZA *et al.*, 2015). Nessa perspectiva, Niwagaba, Mbéguéré e Strande (2014) destacam que não apenas a composição como também a quantidade de fezes produzidas diariamente pode ser alterada de acordo com a rotina alimentar dos usuários: pessoas com uma dieta à base de carne e alimentos processados produzem uma quantidade menor de fezes (massa e volume) se comparado com pessoas que consomem alimentos não processados e com alto teor de fibra.

As variáveis elencadas indicam uma diferença significativa de características (vide Tabela 1) e taxas de acumulação de lodo nos diferentes sistemas e locais onde estão sendo aplicados. Na busca de uma visão geral do atual conhecimento sobre o assunto, um estudo realizou medições físicas em diferentes fossas secas e fossas sépticas da Indonésia, que revelaram um acúmulo de lodo anual de 13 a 25 litros por habitante (MILLS; BLACKETT; TAYLER, 2014). Na África do Sul, uma pesquisa reuniu dados de fossas secas, indicando produção anual de 21 a 64 litros por habitante (STILL; FOXON, 2012). Em relação à Fossa Verde, um estudo feito com vários exemplares do sistema no Ceará mostrou que as taxas de acumulação anual de lodo ficaram dentro da faixa de 7 a 19 litros por habitante (COELHO; REINHARDT; DE ARAÚJO, 2018).

Tabela 1. Principais parâmetros de lodos fecais, segundo a literatura.

REFERÊNCIA	ORIGEM DO LODO	PARÂMETROS					
		pH	Condutividade Elétrica (mS/cm)	Sólidos Totais (%)	Sólidos Voláteis (%)	Carbono Total (%)	Nitrogênio Total (%)
Krueger <i>et al.</i> , 2021	FOSSA SÉPTICA	-	-	0,1 a 7	13 a 91	-	09 a 4,4
	FOSSA SECA (com urina)	-	-	6 a 27	38 a 58	-	1,6 a 3,4
	FOSSA SECA (sem urina)	-	-	7 a 59	18 a 82	-	1 a 4,2
Bassan <i>et al.</i> , 2013	FOSSA SÉPTICA	-	-	0,9	57	-	-
	FOSSA SECA	-	-	1,3	58	-	-
USEPA, 1994	FOSSA SÉPTICA E RUDIMENTAR	1,5 a 12,6	-	0,1 a 13	-	-	-
Heinss <i>et al.</i> , 1999	FOSSA SÉPTICA	7,3 a 7,9	-	1,2 a 7,2	60 a 76	-	-
Penn <i>et al.</i> , 2021	LODO FECAL	6,7 a 8,5	2,2 a 14,6	0,5 a 40	86,8	27,8 a 28,8	3 a 3,2
Still e Foxon, 2012	fossa seca	-	-	23 a 35	34 a 58	-	-

Fonte: o autor (2022).

Quando estabilizado, o lodo derivado de processos de tratamentos de esgoto pode ser gerenciado com segurança para utilização dos seus nutrientes e matéria orgânica (WIJESEKARA *et al.*, 2016). Dessa forma, é dado o nome de biossólido ao lodo devidamente estabilizado e que atende aos critérios microbiológicos e químicos estabelecidos na Resolução nº 498/2020 do CONAMA, estando apto a ser aplicado em solos.

Para Von Sperling e Andreoli (2001), a utilização do termo biossólido valoriza sua utilização produtiva e seus aspectos potencialmente benéficos, contrapondo a simples disposição final improdutiva. De fato, o biossólido oferece matéria orgânica de grande importância para a sustentabilidade dos solos, além de conter macro e micronutrientes essenciais para o desenvolvimento de plantas (PEGORINI; ANDREOLI, 2006). Em contrapartida, Metcalf e Eddy (2016) apontam que um dos fatores que limita a aplicação do biossólido no solo para uso benéfico é a presença de patógenos, metais pesados e compostos orgânicos tóxicos no mesmo. A avaliação dos constituintes específicos do lodo fecal deve, portanto, ser realizada para devido encaminhamento ao processo de higienização e posterior disposição final. Para tal caracterização, devem ser avaliados umidade, sólidos totais, voláteis e fixos, carbono orgânico, relação carbono-nitrogênio (C/N), capacidade de troca de cátions (CTC), nutrientes, pH, condutividade elétrica, entre outros.

De maneira geral, o lodo fecal é caracterizado por uma parcela de água e outra parcela de sólidos totais (ST), subdivididos em sólidos voláteis ou orgânicos (SV/ST) e sólidos fixos ou inorgânicos (SF/ST) (VON SPERLING; GONÇALVES, 2001). A fração orgânica dos sólidos e, conseqüentemente, o nível de digestão do lodo fecal pode ser indicado por meio da relação entre SV/ST, sendo considerado um lodo estável caso a relação for inferior a 0,65 (BRASIL, 2020).

O lodo de esgoto é comumente classificado de acordo com o teor de sólidos totais, sendo chamado de lodo fluido aquele com 0% a 25% de ST, torta semi-sólida quando há de 25% a 35% de ST, sólido duro o intervalo de 35% a 60%, lodo em grânulos quando há 60% a 85% de ST e, por fim, lodo desintegrado em pó fino quando o valor de ST supera 85% (VON SPERLING; GONÇALVES, 2001).

Em se tratando do lodo fecal, a classificação feita de acordo com a sua consistência segue denominando de lodo líquido aquele com  $ST < 5\%$ , lodo pastoso com ST no intervalo entre 5% a 15%, lodo semissólido com ST entre 15% a 25% e lodo sólido com  $ST > 25\%$ , sendo que estas diferenças de umidade do lodo fecal podem definir, inclusive, se ele poderá ser bombeado ou escavado manualmente (VELKUSHANOVA; STRANDE, 2021). De acordo com Metcalf e Eddy (2016), a densidade dos SV/ST (matéria orgânica) é de aproximadamente 1,0, como a da água, enquanto a densidade das partículas de SF/ST (minerais) é próxima a 2,5, de modo que a densidade do lodo depende, portanto, da distribuição relativa entre estes constituintes.

De acordo com Matos (2015), a determinação de carbono orgânico em resíduos sólidos é essencial para obter a relação carbono-nitrogênio. Rodella e Alcarde (1994)

destacam que esta relação C/N pode ser considerada como parâmetro para caracterização do grau de maturação ou decomposição de adubos orgânicos, pois ao sofrer transformações o material orgânico origina compostos mais estáveis, como o húmus. Este processo pode ser acompanhado com a diminuição da relação C/N ao longo do tempo, bem como o aumento das capacidades de troca de cátions (CTC) e a retenção de água.

Moreira e Siqueira (2006) apontam que determinar a relação C/N de um material orgânico é de extrema importância para indicar seu uso agrícola, uma vez que a fertilidade do solo e a nutrição vegetal são fortemente influenciadas pela dinâmica e intensidade entre os processos de mineralização e imobilização dos nutrientes. Enquanto na mineralização as substâncias orgânicas decomponíveis são convertidas em formas inorgânicas (como amônia, nitrato e outros) absorvíveis pelas plantas e pela microbiota do solo, na imobilização ocorre o processo inverso. Dessa forma, a relação C/N do material adicionado ao solo indica se ocorrerá um processo de esgotamento do nitrogênio do solo, caso  $C/N > 30$ , ou de liberação do elemento mineralizado, caso  $C/N < 20$ . Ocorre um equilíbrio entre a mineralização e a imobilização quando a relação C/N se encontra entre 20 e 30, não havendo alteração imediata na disponibilidade dos nutrientes.

Segundo Matos (2015), a capacidade de troca de cátions (CTC) de um resíduo sólido depende do grau de maturação e decomposição em que se encontra, da natureza dos compostos que o constituem, sendo que as propriedades adsorptivas da matéria orgânica se tornam mais acentuadas com sua estabilização, na forma de húmus. Baldotto e Baldotto (2014) definem as substâncias húmicas como compostos orgânicos condensados que são produzidos pela ação microbiana, caracterizado por sua elevada persistência no solo e composto por ácidos fúlvicos, ácidos húmicos e huminas. Além de compor a matriz do solo na forma de colóide orgânico, Moreira e Siqueira (2006) destacam que o húmus exerce também profundos efeitos nas propriedades do solo, influenciando as plantas e organismos direta e indiretamente. Os autores elencam como principais efeitos potenciais do húmus:

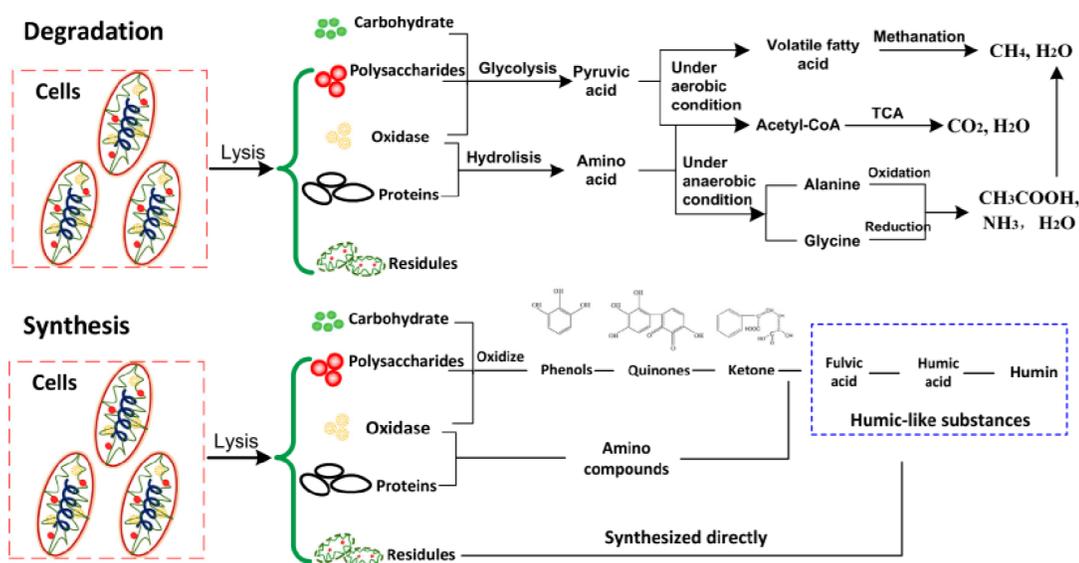
- a) Melhora as condições de agregação e retenção de umidade para solos arenosos, e melhora a aeração e permeabilidade para solos argilosos;
- b) Confere maior estabilidade ao solo, com o aumento da superfície específica, aumento da CTC e efeito tampão;
- c) Atua como agente de complexação, quelação e retenção de nutrientes e xenobióticos;
- d) Exerce efeitos fisiológicos na permeabilidade de membranas, atividade enzimática, fotossíntese e absorção de nutrientes;

e) Atua como reservatório de N, P, S e micronutrientes.

De acordo com Kiehl (2012), o húmus é um coloide eletronegativo possuidor de cargas superficiais negativas que são capazes de adsorver cátions de cargas positivas. Dessa forma, o autor aponta que a CTC se origina e aumenta com a decomposição da matéria orgânica, sendo um parâmetro excelente e confiável para o acompanhamento e comprovação da maturação do resíduo orgânico.

Mei, Tang e Zhang (2020) sugerem um novo parâmetro complementar, que avalia o nível de estabilização da matéria orgânica através do seu grau de humificação. Os autores pesquisaram o processo de tratamento de lodo em meio anaeróbico e aeróbico, chegando à conclusão de que os procedimentos de estabilização envolvem não apenas a degradação de proteínas, polissacarídeos, lipídios, entre outros, mas também envolvem a síntese de orgânicos complexos e estáveis, como substâncias húmicas (processos representados na Figura 11).

Figura 11. Mecanismo de transformação da matéria orgânica durante a estabilização do lodo.



Fonte: Mei, Tang e Zhang (2020)

Devido à concentração de nutrientes nos fertilizantes orgânicos, Kiehl (2010) indica a utilização do conceito de melhorador ou condicionador de solo para eles, pois são produtos que melhoram as propriedades físicas, físico-químicas e biológicas do solo. O autor ressalta, no entanto, as potencialidades do uso de fertilizantes orgânicos, mesmo que apresentem concentrações não tão altas de nutrientes. De acordo com Andreoli, Pegorini e Fernandes (2001), os nutrientes encontrados em maior quantidade nos biossólidos são o

nitrogênio e o fósforo. Estão presentes em menores quantidades os elementos cálcio, magnésio (exceto nos biossólidos higienizados por caleação) e potássio, sendo que este último se encontra em forma prontamente assimilável pelas plantas. Os autores ainda indicam que os lodos geralmente contêm micronutrientes em quantidades variáveis, sendo maior as de ferro, cobre, zinco e manganês e menores as de boro e molibidênio. Segundo Tsutiya (2001), quando o biossólido é aplicado em taxas suficientes de modo a suprir as necessidades de nitrogênio, normalmente atende também as necessidades de micronutrientes das plantas.

Dos nutrientes presentes no lodo, o nitrogênio é o elemento de maior valor econômico e também o que apresenta a maior resposta frente às culturas. O nitrogênio provém dos dejetos presentes no esgoto e também da biomassa microbiana, se apresentando no lodo na forma inorgânica, como nitratos e amônia, e na forma orgânica, constituindo moléculas de proteínas, amino-açúcares, aminoácidos, amidos, associados a polímeros entre outros. A fração inorgânica se encontra prontamente disponível para as plantas, ainda que represente uma pequena porção do nitrogênio total. Por outro lado, a fração orgânica corresponde de 70% a 90% do nitrogênio do lodo, mas deverá sofrer o processo de mineralização para então ser absorvida pelas plantas (ANDREOLI; PEGORINI; FERNANDES, 2001). Nessa perspectiva, Kiehl (1985) aponta que o nitrogênio inorgânico é rapidamente absorvido, lixiviado ou perdido para a atmosfera por meio da desnitrificação, enquanto o nitrogênio orgânico represente um reservatório do nutriente a longo prazo.

O pH é um parâmetro que expressa a medida da atividade dos íons  $H^+$  no meio, sendo que ele é um fator que influencia fortemente na taxa de degradação bioquímica da matéria orgânica. O valor do pH pode variar dependendo da origem e do estágio de degradação bioquímica que se encontra, sendo que em resíduos sólidos orgânicos estabilizados este parâmetro se apresenta geralmente na faixa de 6,0 a 8,0 (MATOS, 2015). Para uso agrônômicos, Sharma *et al.* (1997) afirmam que são admitidos materiais com pH em água na faixa de 6,0 a 8,5.

No caso de resíduos sólidos, a condutividade elétrica expressa a concentração de íons solubilizáveis no material e, portanto, o potencial salinizante do mesmo (MATOS, 2015). Tendo em vista que uma quantidade de sais em excesso no solo pode prejudicar a vida das culturas, Sharma *et al.* (1997) indicam valores de condutividade elétrica entre 0,64 a 6,68 dS/m para resíduos orgânicos para uso agrícola, enquanto Kiehl (2012) afirma que os valores não devem exceder 4 dS/m.

O uso agrícola do lodo de esgoto e fecal exige uma atenção especial quanto à proteção do meio ambiente, bem como da saúde humana e animal, regulamentada no Brasil

pela Resolução nº 498/2020 do CONAMA. Segundo Tsutiya (2001), a quantidade de patógenos presentes no lodo varia fundamentalmente de acordo com as condições socioeconômicas dos usuários, das condições sanitárias da região e do tipo de tratamento do lodo. O autor afirma que mesmo que a maior parte dos microrganismos presentes no lodo não tenha importância médica ou veterinária, existe uma pequena parcela que é patogênica, constituída por vírus, bactérias, fungos, protozoários e helmintos.

Ainda que existam meios de testar todos os patógenos presentes no lodo, estes procedimentos laboratoriais especializados requerem alto nível de esforço e despesa (TAYLER, 2018). Uma alternativa comum exposta pelo autor para avaliar o risco de patógenos microbiológicos é através da utilização de bactérias indicadoras como *proxy*, sendo as mais comumente utilizadas os coliformes fecais e *Escherichia coli* (*E. coli*). Vale ressaltar que esta última é um tipo específico de coliformes fecais que habita o intestino humano e outros animais homeotérmicos. Abaixo são apresentados os dados compilados de diferentes referências bibliográficas na Tabela 2, referentes a estes indicadores microbiológicos de lodo de esgoto e fecal.

Tabela 2. Indicadores microbiológicos de lodo de esgoto e fecal

REFERÊNCIA		PARÂMETROS	
		<i>E. coli</i> log(UFC/g ST)	coliforme fecal log(UFC/g ST)
Wong <i>et al.</i> , 2012	LODO DESAGUADO	7,1	6,5
	DIGESTÃO ANAERÓBIA MESOFÍLICA	3,9	3,8
Astals <i>et al.</i> , 2012	LODO PRIMÁRIO	6,4	-
	DIGESTÃO ANAERÓBIA TERMOFÍLICA	2,2	-
Lalander <i>et al.</i> , 2013	VERMICOMPOSTO	-	3,9
Ruiz - Hernando <i>et al.</i> , 2014	LODO SECUNDÁRIO	6	-
USEPA, 1994	FOSSA SÉPTICA E RUDIMENTAR	-	6 a 8
Lucena <i>et al.</i> , 2003	LODO DE FOSSA SÉPTICA	-	6,7 log(UFC/100mL)

Fonte: o autor (2022).

### 2.3 Coleta e transporte do lodo

O lodo fecal pode ser removido dos sistemas individuais de tratamento usando-se técnicas manuais ou mecânicas, dependendo dos equipamentos disponíveis no local, da acessibilidade a tais equipamentos e das características do lodo fecal. É, portanto, importante conhecer as propriedades do lodo fecal a ser coletado, que são influenciadas pela idade deste lodo, o teor de água, a presença de material não biodegradável e material orgânico (MIKHAEL *et al.*, 2014).

De acordo com Klingel *et al.* (2002), a coleta do lodo fecal deve ser feita sempre visando a forma mais segura e viável. Mikhael *et al.* (2014) classificam as maneiras de coleta do lodo fecal entre manual, mecânica operada manualmente ou totalmente mecanizada. Segundo os autores, a coleta manual pode ser direta ou indireta, de acordo com o contato que o operador terá com o lodo fecal: enquanto a coleta manual direta é aquela em que o operador utiliza ferramentas como baldes e pás para manusear o lodo, um exemplo de coleta manual indireta é o uso de um dispositivo de armazenamento de lodo que é substituído periodicamente.

A coleta mecânica operada manualmente oferece vantagens à manual, como maior rapidez, segurança e eficiência. Esta forma de coleta consiste no bombeamento mecânico do lodo fecal através do uso de energia humana, como bomba de diafragma, *nibbler*, *sludge gulper* e *MAPET – Manual Pit Emptying Technology* (MIKHAEL *et al.*, 2014).

Por fim, a forma de coleta totalmente mecanizada utiliza tecnologias movidas por eletricidade, combustível ou sistemas pneumáticos. Existe uma variedade grande destes equipamentos, com escalas variáveis, podendo até estar associado a veículos responsáveis pelo transporte do lodo fecal. São exemplos deste tipo de coleta: motobomba diafragma, motobomba centrífuga, caminhão limpa-fossa (a vácuo), parafuso de Arquimedes e *Gobbler* (MIKHAEL *et al.*, 2014).

Analisando as opções de coleta, Klingel *et al.* (2002) recomendam que a coleta manual direta do lodo fecal deve ser utilizada apenas como última opção, pois oferece um risco potencial de contaminação do operador. De acordo com os autores, caso não haja a possibilidade de a coleta do lodo ser feita de maneira mecânica, é de suma importância o uso de equipamentos de proteção individual do operador, bem como a gestão de todos os equipamentos utilizados e da higiene pessoal e do local, após o trabalho.

O lodo fecal, após coletado, deve ser encaminhado para um local de tratamento.

Segundo Mikhael *et al.* (2014), este transporte pode ser feito com uso de equipamentos movidos manualmente (por força animal ou humana) ou movido a combustível. No primeiro caso são usados equipamentos de baixo custo, como carruiolas de construção civil ou outros projetos como o ilustrado na Figura 12 (MIKHAEL *et al.*, 2014). Estas soluções são, no entanto, limitadas quanto capacidade de carga e deslocamento, não sendo aconselháveis para longas distâncias. Por outro lado, os equipamentos de transporte motorizado são mais ágeis, oferecem maior alcance e têm potencial para maiores capacidades de carga, mas exigem conhecimentos e habilidades para manutenção e manuseio. São exemplos desta maneira de transporte triciclos motorizados, picapes e até caminhões limpa-fossa, sendo que este último pode fazer tanto a coleta quanto o transporte do lodo fecal (MIKHAEL *et al.*, 2014; STIL; FOXON, 2012).

Figura 12. Modalidade de transporte ativo de lodo fecal com destino à estação de tratamento utilizado em países como Quênia e África do Sul.



Fonte: MIKHAEL *et al.*, 2014;

Para além de todos os cuidados relacionados ao risco de saúde do operador durante o manuseio do lodo fecal, Klingel *et al.* (2002) ressaltam que um dos grandes problemas envolvidos no transporte manual está relacionado com o descarte em si, que acaba ocorrendo em locais indevidos, devido à limitação de deslocamento e também de desconhecimento dos riscos envolvidos na disposição inadequada do lodo fecal.

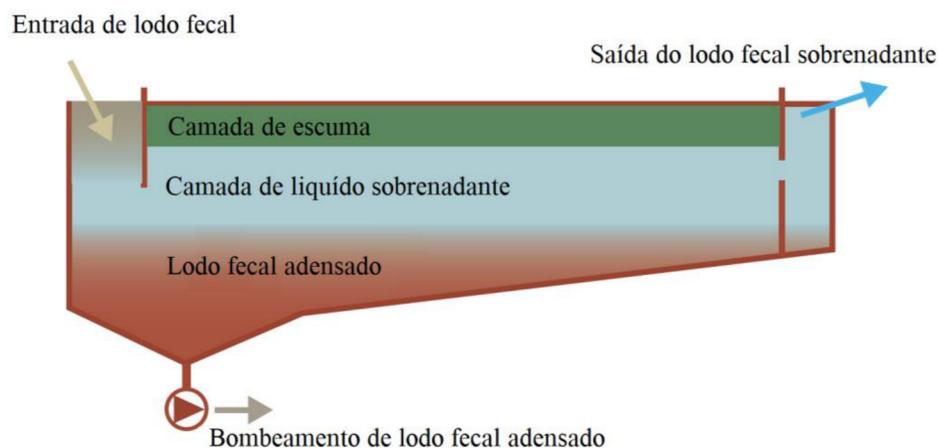
## **2.4 Tratamento do lodo**

### ***2.4.1 Adensamento***

Esta é uma etapa que facilita as demais subsequentes de tratamento do lodo, uma vez que ela reduz consideravelmente seu volume, ao diminuir a umidade. A concentração dos sólidos ocorre por meio de processos físicos, por simples ação gravitacional ou por flotação. Gonçalves, Ludovice e Von Sperling (2001) apontam para a eficiência desta etapa que possibilita a redução na ordem de 60% do volume do lodo inicial, tendo aumentado a concentração dos sólidos de 2% a 5% de ST. De acordo com os autores citados, os principais processos utilizados nas ETEs para o adensamento de lodo são flotação por ar dissolvido, centrífugas e os adensadores por gravidade.

Para o caso dos lodos fecais, o processo de adensamento é normalmente realizado em tanques de sedimentação retangulares, cujo projeto oferece formato e mecanismos para a separação sólido-líquido semelhante à fossa séptica. O lodo fecal é descarregado na parte superior do tanque e o efluente líquido com menor concentração de sólidos sai pelo extremo oposto do tanque, sendo que durante o tempo de detenção, os sólidos mais pesados decantam por força gravitacional para o fundo do tanque, que é inclinado. Como pode ser visto na Figura 13, a entrada do lodo é amparada por uma chicana, que diminui a turbulência do material flotado e impede curto-circuito; antes da saída do efluente líquido do tanque de sedimentação há uma parede janelada, que propicia a separação do material flotado e sólido sedimentado, facilitando a saída da camada sobrenadante. Depois de um certo tempo de detenção, o lodo compactado e sedimentado é bombeado para a etapa de estabilização ou desaguamento. O efluente sobrenadante segue para o tratamento da fase líquida, enquanto as partículas flotadas, como gorduras, óleos e graxas, são retiradas e destinadas para o aterro sanitário (DODANE; BASSAN, 2014).

Figura 13. Esquema representando o processo de adensamento do lodo fecal.



Fonte: Adaptado de Dodane e Bassan., 2014

No que diz respeito ao uso de tanques de sedimentação para Estações de Tratamento de Lodos Fecais (ETLF), Dodane e Bassan (2014) indicam como casos de sucesso os exemplares construídos em Accra (Gana) e Dakar (Senegal), uma vez que estão em operação desde final dos anos 1980 e 2006, respectivamente. Por outro lado, os autores indicam como caso de insucesso os tanques de sedimentação feitos em Camberene e Rufisque (Senegal), já que foram mal dimensionadas as bombas e não tinham potência suficiente para fazer a extração do lodo adensado.

#### **2.4.2 Estabilização**

A matéria orgânica biodegradável presente no lodo fecal não tratado, em seu estado natural, varia de acordo com a sua fonte, mas geralmente precisa ser estabilizada antes do seu uso final ou descarte. O lodo fecal é caracterizado por ter grande quantidade de organismos patogênicos, ser facilmente putrescível e desenvolver odores ofensivos com rapidez, por isso sua estabilização tem por objetivo estabilizar a fração biodegradável da matéria orgânica, reduzindo a quantidade de patógenos e do seu potencial de putrefação. O lodo fecal estabilizado é caracterizado pela sua resistência à biodegradação posterior, sendo composto por partículas como a lignina, celulose, matéria inorgânica e matéria celular de microrganismos que consumiram as substâncias prontamente degradáveis (BASSAN; DODANE; STRANDE, 2014).

De acordo com Luduvic (2001), os processos de estabilização podem ser divididos em: estabilização biológica, através da digestão anaeróbia, digestão aeróbia e

compostagem; estabilização química, pela adição de produtos químicos, como a cal; e a estabilização térmica, com adição de calor no lodo. Os meios utilizados para a estabilização do lodo estão diretamente relacionados com a diminuição da fração volátil do lodo e o acréscimo de produtos químicos, de modo a dificultar a sobrevivência dos microrganismos. Para além dos aspectos de saúde pública, estes processos de estabilização resultam também na redução do volume do lodo, na produção de gás metano e na melhoria de suas características para a etapa do desaguamento (Metcalf; Eddy, 2016).

Um exemplo de utilização da etapa de estabilização em ETLF é citado por Tayler (2018) usando o tanque Imhoff na Indonésia e outros países. Esta tecnologia reúne os efeitos de um decantador com os de um digestor anaeróbio, correspondendo à junção das etapas de adensamento e estabilização.

### **2.4.3 Condicionamento**

O objetivo do condicionamento do lodo é melhorar as características de separação das fases sólido-líquidas do lodo, sendo que esse processo permite que as partículas pequenas se juntem para formar agregados maiores, ou flocos. O condicionamento neutraliza ou desestabiliza as forças química ou físicas atuantes nas partículas coloidais, bem como no material particulado em suspensão, imersos no líquido. De acordo com a USEPA (1999), o lodo fecal é resistente ao desaguamento, dessa forma, uma boa combinação para o seu tratamento é a etapa de condicionamento anteceder as etapas de desaguamento e/ou adensamento, que se beneficiam com a formação dos flocos pesados e têm sua eficiência aumentada (MIKI; ALEM SOBRINHO; VAN HAANDEL, 2006).

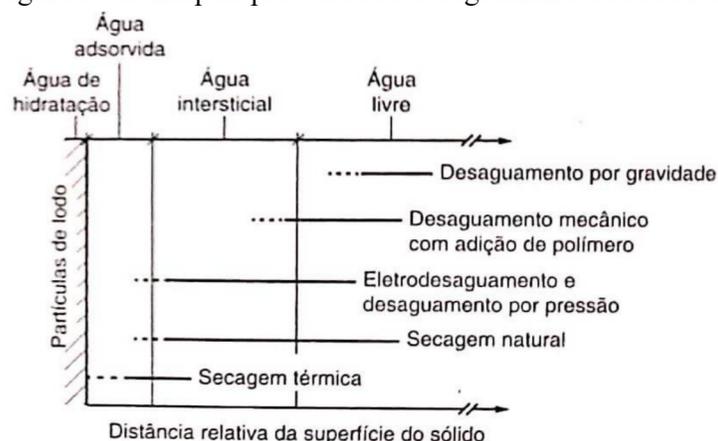
No entanto, os condicionadores comercialmente utilizados nesta etapa de tratamento, como polieletrólitos orgânicos, cal, cloreto férrico, entre outros, são caros e geralmente precisam ser importados pelos países de baixa renda, dificultando a sua utilização e consequente eficiência dos tratamentos. Gold *et al.* (2016) indicam a existência de alguns condicionantes alternativos, que não comprometem o desempenho do tratamento e podem ser produzidos com recursos locais, tais como: as sementes de *Moringa oleifera*, as sementes de *Jatropha curcas*, as folhas de *Calotropis procera* e a Quitosana.

#### 2.4.4 Desaguamento

O desaguamento é uma operação unitária física que consiste na separação sólido-líquido do lodo, sendo que a diminuição do teor de água é acompanhada pela diminuição significativa do volume do lodo. Dessa forma, Metcalf e Eddy (2016) elencam as seguintes vantagens para realização do desaguamento: diminuição dos custos de transporte e destino final do lodo, facilidade de manuseio do lodo, redução de material estruturante para possível compostagem do lodo, produção de um biossólido mais estável biologicamente e com odores mais amenos.

O objetivo principal do desaguamento é aumentar o teor de sólidos totais do lodo até que ele atinja a consistência de torta, podendo ser tratado como sólido. É, portanto, aceitável que esta secagem possa ser feita naturalmente ou usando meios mecânicos, sendo que cada processo de desaguamento possibilita a remoção de uma ou mais formas de água associadas ao lodo, como ilustrado na Figura 14 (Metcalf e Eddy, 2016).

Figura 14. Principais processos de desaguamento do lodo fecal.



Fonte: Metcalf e Eddy, 2016

Os processos naturais de desaguamento de lodo, tais como os leitos de secagem e as lagoas de secagem, fazem a remoção da água livre, intersticial e adsorvida (Figura 14) através da evaporação e percolação, e o *wetland* construído de fluxo vertical (WCFV) remove a água pela evapotranspiração e percolação. Para estes tipos de processos, o lodo precisa ficar exposto às condições que promovem o desaguamento por um período determinado, o que demanda tempo e área. Por outro lado, os métodos mecânicos de desaguamento de lodo possuem um processo acelerado de desaguamento, utilizando mecanismos como a filtração, a compactação ou a centrifugação. São unidades mais compactas e elaboradas operacionalmente, tais como os filtros prensas de esteira e de placas, centrífugas, prensa parafuso, tubo de membrana geotêxtil, entre outros (MIKI, ALEM SOBRINHO E VAN

HAANDEL, 2006).

Os WCFV têm sido utilizados desde o final dos anos 1980 na Europa para estabilizar e desaguar o lodo de pequenas estações de tratamento, principalmente na Dinamarca, que conta com mais de 140 sistemas em escala real (UGGETTI *et al.*, 2010). No que diz respeito aos processos de desaguentos para ETLF, o Departamento de Água e Saneamento em Países em Desenvolvimento do Instituto Federal Suíço de Ciência e Tecnologia Aquática (SANDEC / EAWAG) e outros parceiros desenvolvem pesquisas desde 1996 para determinar a eficiência deste tipo de tratamento. Destes levantamentos, são destacados WCFV para tratamento de lodo fecal em escala piloto na Tailândia e em Camarões, já em escala real em Dakar, Senegal (KENGNE e TILLEY, 2014).

No âmbito brasileiro, Andrade, Von Sperling e Manjate (2017) realizaram uma pesquisa na ETE Arrudas, em Belo Horizonte, com WCFV que recebia semanalmente o lodo de caminhão limpa fossa de diferentes empresas. A desidratação do lodo acumulado se mostrou satisfatória durante o período analisado, de setembro de 2013 a outubro de 2014, sendo que o lodo de entrada possuía média de 0,23% de ST, chegando a 55% de ST no final da pesquisa.

#### **2.4.5 Higienização**

A etapa de higienização do lodo é realizada por tecnologias de processamento que têm por objetivo a redução do número de microrganismos patogênicos, obtendo no final um produto seguro e apto para o uso agrícola denominado biossólido. Segundo Pinto (2007), os mecanismos de higienização se inter-relacionam de modo a garantir a produção de um biossólido com nível de patogenicidade adequado previsto nas normativas do país. No Brasil, a legislação específica que define os critérios e procedimentos para produção e disposição final de biossólidos em solos é feita pelo CONAMA, por meio da Resolução nº 498/2020, que adotou como padrão de controle e garantia da saúde da população duas categorias de qualidade microbiológica para o lodo higienizado: o biossólido Classe A e Classe B.

Para a produção do biossólido Classe A, o lodo deve ser submetido a um dos processos de redução de patógenos apresentados no Quadro 1, de modo a atender ao limite máximo de  $10^3$  *Escherichia coli* por grama de ST sendo necessariamente oriundo de um dos processos de redução de patógenos descritos no quadro citado. Nas alternativas 3 e 4 além do limite de *E. coli* deve ser também atendido o limite máximo de 1 ovo viável de helminto por grama de ST. Vale destacar que todos estes parâmetros operacionais atendidos devem ser demonstrados por meio do monitoramento dos mesmos.

Quadro 1. Processos para obtenção de biossólido Classe A

PROCESSO	REQUISITOS			
	Regime	Aplicação	Requisitos	Relação Tempo x Temperatura
<b>Alternativa 1:</b> Lodo tratado por um dos quatro regimes (A, B, C e D) apresentados ao lado) de tempo (D em dias) e temperatura (t em °C). O período de tempo associado a determinado valor de temperatura deve ser determinado por meio das equações para cada regime apresentadas, na última coluna dessa tabela, devendo-se respeitar os requisitos mínimos de tempo e temperatura para cada regime especificados na quarta coluna desta tabela.	A	Lodo com teor de ST igual ou maior que 7% (exceto aqueles atendidos pelo regime B)	A temperatura do lodo deve ser mantida igual ou acima de 50°C por no mínimo 20 minutos.	$D = \frac{131700000}{10^{0,14t}}$
	B	Lodo com ST igual ou maior que 7%, na forma de pequenas partículas, aquecido por meio do contato entre gases ou líquidos imiscíveis.	A temperatura do lodo deve ser mantida igual ou acima de 50°C por no mínimo 15 segundos.	$D = \frac{131700000}{10^{0,14t}}$
	C	Lodo com teor de ST menor que 7%	Aquecido de, no mínimo, 15 segundos até 30 minutos.	$D = \frac{131700000}{10^{0,14t}}$
	D	Lodo com teor de ST menor que 7%	A temperatura do lodo deve ser mantida igual ou acima de 50°C por no mínimo 30 minutos de tempo de contato.	$D = \frac{50070000}{10^{0,14t}}$
<b>Alternativa 2:</b> Lodo tratado por processos que proporcionem valores elevados de pH e temperatura.	Processos que proporcionem elevação do pH (valores acima de 12, por pelo menos 72 horas) e da temperatura (mantida acima de 50°C, por pelo menos 12 horas durante o período em que o pH estiver acima de 12) e secagem do lodo de esgoto sanitário por exposição ao ar, no caso de materiais que permaneçam com teor de ST maior que 50%, após o período de 72 horas da mistura do material alcalino.			
<b>Alternativa 3:</b> Lodo tratado em processos de regime de Tempo X Temperatura ou de pH e temperatura elevados que não atendem os requisitos descritos nas alternativas 1 e 2.	Esta alternativa depende da validação do processo de tratamento, deve-se documentar as condições de operação que garantam a obtenção de biossólido com menos de 1 ovo viável de helminto g <sup>-1</sup> de ST. Demonstrada essa condição, os parâmetros de controle operacional do processo de tratamento podem ser utilizados como indicadores da produção de biossólido classe A, não sendo mais necessário caracterizar o lodo tratado em termos de ovos de helmintos. Para validação dessa alternativa um plano de amostragem detalhado deve ser submetido ao órgão ambiental competente.			
<b>Alternativa 4:</b> Lodo tratado em processos não especificado	<ul style="list-style-type: none"> <li>Esta alternativa é aplicada somente a biossólido a ser destinado em lotes.</li> </ul> A caracterização de ovos viáveis de helmintos deve ser realizada no momento da formação do lote de biossólido e sua presença deverá ser menor que 1 (um) ovo viável de helmintos (nematoides intestinais humanos) por grama de sólido total (g <sup>-1</sup> de ST).			
<b>Alternativa 5:</b> Lodo tratado em um dos processos de redução adicional de patógenos, listados na coluna ao lado	<ul style="list-style-type: none"> <li>Atendimento dos requisitos de <i>Escherichia coli</i> de Classe A e atendimento dos seguintes critérios, de acordo com cada processo de redução adicional de patógenos:               <ol style="list-style-type: none"> <li>compostagem confinada ou em leiras aeradas (3 dias a 55°C no mínimo) ou com revolvimento das leiras (15 dias a 55°C no mínimo, com revolvimento mecânico da leira durante pelo menos 5 dias, ao longo dos 15 do processamento);</li> <li>secagem térmica direta ou indireta para reduzir o teor de água no lodo de esgoto a 10% ou menos, devendo a temperatura das partículas de lodo superar 80°C ou a temperatura de bulbo úmido de gás, em contato com o lodo de esgoto, no momento da descarga do secador, ser superior a 80°C;</li> <li>tratamento térmico pelo aquecimento do lodo de esgoto sanitário, na forma líquida, a 180°C, no mínimo, durante um período de 30 minutos;</li> <li>digestão aeróbia termofílica a ar ou oxigênio, com tempos de residência de 10 dias, sob temperaturas de 55 a 60°C;</li> <li>processos de irradiação com raios beta a dosagens mínimas de 1 megarad a 20°C, ou com raios gama na mesma intensidade e temperatura, a partir de isótopos de Cobalto 60 ou Césio 137;</li> <li>processos de pasteurização, pela manutenção do lodo de esgoto a uma temperatura mínima de 70°C, por um período de pelo menos 30 minutos.</li> </ol> </li> </ul>			
<b>Alternativa 6:</b> Lodo tratado em um processo equivalente a um processo de redução adicional de patógenos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>O lodo de esgoto sanitário é tratado por um outro processo, comprovadamente equivalente a um processo de redução adicional de patógenos e aceito pelo órgão ambiental competente.</li> </ul>			

Fonte: CONAMA, 498/2020.

O biossólido classificado como Classe B é aquele que atende ao limite máximo de  $10^6$  *Escherichia coli* por grama de ST ou que seja oriundo de alguns dos processos de redução de patógenos descritos no Quadro 2, com demonstração dos parâmetros operacionais atendidos. Dessa forma, caso haja o monitoramento e demonstração de atendimento dos parâmetros operacionais indicados, não é necessária a análise laboratorial microbiológica para classificação do biossólido de Classe B (CONAMA, 2020).

Quadro 2. Processos para obtenção de biossólido Classe B

PROCESSO	REQUISITOS
<p><b>Alternativa 1:</b></p> <p>Lodo tratado em um processo de redução significativa de patógenos.</p>	a) digestão aeróbia – a ar ou oxigênio, com retenções mínimas de 40 dias, sob temperatura de 20°C ou por 60 dias, sob temperatura de 15°C;
	b) secagem em leitos de areia ou em bacias (solarização), pavimentadas ou não, cobertas ou não, até atingir teor de sólidos mínimo de 60%;
	c) digestão anaeróbia por um período mínimo de 15 dias a 35-55°C ou de 60 dias a 20°C;
	d) compostagem por qualquer um dos métodos citados anteriormente, desde que a biomassa atinja uma temperatura mínima de 40°C, durante pelo menos cinco dias, com a ocorrência de um pico de 55°C, ao longo de quatro horas sucessivas durante este período;
	e) estabilização com cal, mediante adição de quantidade suficiente para que o pH seja elevado até pelo menos 12, por um período mínimo de duas horas.
<p><b>Alternativa 2:</b></p> <p>Lodo tratado em um processo equivalente aos de redução significativa de patógenos.</p>	O lodo de esgoto sanitário é tratado por um outro processo, comprovadamente equivalente a um processo de redução significativa de patógenos e aceito pelo órgão ambiental competente.

Fonte: CONAMA, 498/2020.

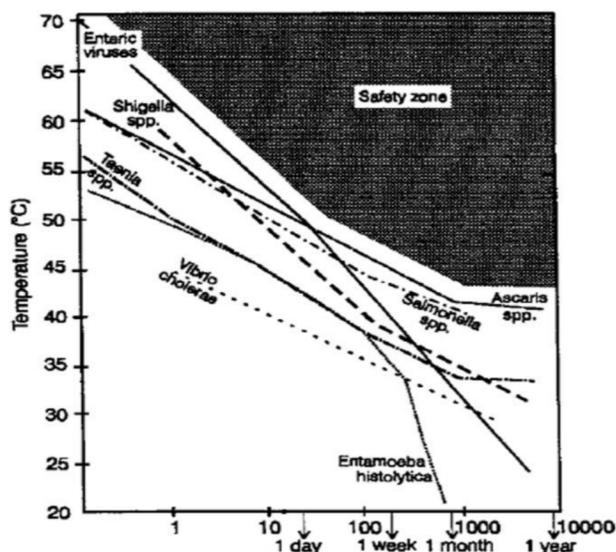
Para sintetizar o que foi exposto anteriormente, para produzir um biossólido classe A é necessário escolher uma das alternativas de processos de redução de patógenos e realizar o monitoramento operacional e microbiológico. Já para obter um biossólido Classe B é necessário adotar uma das alternativas de processo de redução de patógenos e escolher apenas um monitoramento, podendo ser operacional ou microbiológico. Os processos para higienização do lodo baseiam-se na alteração de alguns parâmetros operacionais. Para uma melhor compreensão do assunto, a seguir são expostos os fundamentos teóricos sobre os quais essas tecnologias se baseiam para alcançar a inativação dos patógenos.

### Mecanismo térmico

De acordo com Bassan, Dodane e Strande (2014), em temperaturas superiores a 60°C ocorre o processo de desnaturação dos ácidos nucleicos e proteicos e, conseqüentemente, a inativação da maioria dos organismos patogênicos. Vale ressaltar que as variáveis de controle tempo e temperatura agem em conjunto no processo de redução dos microrganismos patogênicos do lodo: quanto maior a temperatura, menor o tempo necessário de permanência do lodo para inativação dos patógenos.

Em seus estudos, Feacham *et al.* (1983) mapearam os dados para determinar a curva de morte térmica de muitos patógenos entéricos, que foram agrupados em um único gráfico por Strauch (1991 e 1998), aqui demonstrada na Figura 15. Na referida figura demonstra-se a "zona de segurança" (*safety zone*), na qual os parâmetros operacionais estão em desacordo com os requisitos, o que resulta em um lodo livre de patógenos. Nesta perspectiva, os parâmetros operacionais devem ser superiores a 7 minutos a uma temperatura de 70 °C; 30 minutos a 65 °C; 2 horas a 60 °C; 15 horas a 55 °C ou 3 dias a 50 °C.

Figura 15. Requisitos de tempo x temperatura para produção de lodo isento de patógenos



Fonte: Strauch, 1998

Na Alternativa 1 do Quadro 1, nota-se que para produção de biossólidos Classe A é necessário combinar três parâmetros operacionais, que relacionam o tempo de permanência do lodo, de acordo com o teor de sólidos a uma certa temperatura. Dessa forma, para atingir a qualidade microbiológica exigida, além do tempo e da temperatura, o teor de ST é levado em

consideração, pois as difusividades térmicas são alteradas conforme a concentração do mesmo.

A partir disso o CONAMA propôs quatro regimes denominados de A, B, C e D com requisitos, aplicações e uma equação para a relação tempo x temperatura (D em dias e t em °C) para cada regime que são apresentados no Quadro 1. Exemplificando a aplicação da equação para o regime A, é necessário um tempo de 13,17 dias à temperatura de 50 °C, 2,63 dias a 55 °C e 0,52 dias a 60 °C para que o lodo se transforme num biossólido Classe A.

Comparando os tempos de higienização propostos pela figura 15 e pelo Regime A do Quadro 1, nota-se que este último é muito mais conservador e, conseqüentemente, mais seguro, pois exige um tempo de contato muito maior do lodo nas temperaturas definidas.

### **Mecanismo químico**

De acordo com Bassan, Dodane e Strande (2014), a maioria dos microrganismos sobrevive e cresce quando dentro de uma faixa de 2-3 unidades de pH, sendo que poucos podem sobreviver estando abaixo de pH 3 ou acima de pH 10. Partindo dessas constatações, pode-se concluir que ao adicionar uma substância química alcalinizante ao lodo, elevando o pH para valores acima de 12, o ambiente se torna inóspito e letal para os microrganismos patogênicos ali presentes. O produto químico adicionado pode causar uma elevação na temperatura da mistura (processo exotérmico), como por exemplo ao utilizar a cal virgem (CaO). Nestes casos há a combinação dos mecanismos térmicos e químicos, criando uma condição mais efetiva para a inativação dos microrganismos e sendo, conseqüentemente, um processo mais rápido (PINTO, 2007).

De acordo com o CONAMA, é possível se obter um biossólido Classe A através da Alternativa 2 (vide Quadro 1), que associa mecanismos químicos, térmicos e dessecação, enquanto para obtenção de um biossólido Classe B, através da Alternativa 1, ocorre apenas o mecanismo químico.

### **Mecanismo biológico**

A via Biológica para a inativação de microrganismos patogênicos é uma grande lacuna do conhecimento para a aceitação científica, ainda assim Pinto (2001) indica que a vermicompostagem é uma das alternativas mais conhecidas, sendo uma tecnologia segura e de baixo custo para a estabilização e higienização de lodo fecal e de esgoto.

A vermicompostagem é uma variante da tecnologia compostagem, em que se utiliza das minhocas detritívoras para digerir a matéria orgânica de diversos resíduos sólidos,

incluindo lodo fecal e de esgoto. O processo de higienização ocorre pela atividade gástrica das minhocas, pois junto com os resíduos orgânicos, elas também ingerem os microrganismos patogênicos ali contidos, inativando-os no processo (RODRÍGUEZ-CANCHÉ *et al.*, 2010).

Elas podem ser cultivadas em viveiros ou minhocários, sendo muito usadas as espécies *Eisenia fetida*, *Eisenia andrei*, *Eudrilus eugeniae*. O vermicomposto resultante é popularmente conhecido como húmus de minhoca e é considerado um ótimo condicionador de solos, de fácil assimilação dos vegetais, que consiste na matéria orgânica humificada e nos excrementos de minhoca, a partir de resíduos orgânicos (YADAV; TARE; AHAMMED, 2011).

### **Mecanismo de dessecação**

Como os microrganismos necessitam de água para sobreviver, um dos mecanismos de higienização utilizado é a dessecação ou desidratação, ou seja, a retirada da água presente no lodo. De acordo com Pinto (2001), a diminuição da umidade também está relacionada com a inativação dos ovos de helminto e oocistos de protozoários, no entanto, os ovos de *Ascaris* spp. se mostram bastante resistentes a este mecanismo de higienização.

Das tecnologias utilizadas para a dessecação, os leitos de secagem são os mais utilizados, mas vale ressaltar que no próprio armazenamento posterior pode continuar ocorrendo a redução da água disponível no material, contribuindo no processo de higienização (BASSAN; DODANE; STRANDE, 2014).

### **Mecanismo de irradiação**

Segundo Pinto (2001), uma das formas de higienizar o lodo é através da utilização da irradiação, pois quando aplicados em doses adequadas, os raios Beta e Gama agem diretamente nas estruturas coloidais das células, inativando os microrganismos patogênicos. Para produção de biossólido Classe A, através da alternativa 5 e, a recomendação do CONAMA nº 498/2020 é de uma dosagem maior que 1 megarad na temperatura de 20 °C para raios Beta, e da dosagem maior que 1 megarad na temperatura de 20 °C para raios Gama, a partir de isótopos de Cobalto 60 ou Césio 137.

O sol é fonte de radiação eletromagnética, cujo espectro é dividido em intervalos de onda, podendo ser destacadas as faixas do ultravioleta (UV), do infravermelho e da própria luz visível (ALVES *et al.*, 2021). O aumento da temperatura causado pelos raios infravermelho faz com que este seja aqui classificado como um mecanismo térmico. No que diz respeito ao poder bactericida da radiação solar, pesquisas apontam que a ação dos raios

ultravioletas provoca a inativação de microrganismos patogênicos ao submeter o lodo diretamente à radiação solar (PINTO, 2001). De acordo com Borrely *et al.* (1998), o UV na faixa de 300-400 nm é capaz de realizar a desnaturação do DNA das moléculas por meio de reações fotoquímicas, efetivamente inativando os agentes patogênicos.

De acordo com as recomendações do CONAMA nº 498/2020 é possível produzir um biossólido Classe B a partir da alternativa 1 b, combinando os mecanismos térmicos, de dessecação e irradiação com a utilização da radiação solar.

## **2.5 Alternativas para a disposição final do lodo e biossólido**

De acordo com Tsutiya (2001), as alternativas mais usuais para a disposição final de lodos e biossólidos são o uso agrícola, aplicação em plantações florestais, disposição em aterros, incineração, reúso industrial, disposição oceânica e recuperação de solos (áreas degradadas). Para além dos aspectos técnicos envolvidos na etapa da disposição final de lodos e biossólidos, também devem ser consideradas as questões legais e socioambientais relativas ao assunto. A crescente preocupação com o meio ambiente busca formas de preservá-lo, tendo como um exemplo a diminuição significativa da descarga oceânica de lodos: tal prática foi banida nos EUA e na Europa, respectivamente, em 1991 e 1998 (SHARMA *et al.*, 2017).

Segundo Poggiani, Silva e Guedes (2006), no Brasil os resíduos dos processos de tratamento de esgoto doméstico ainda são vistos através da óptica do descarte e não como um subproduto de interesse comercial. Isso faz com que os efluentes líquidos sejam lançados nos rios, enquanto os lodos são dispostos majoritariamente nos aterros sanitários, como pode ser visto na Tabela 3. Vale ressaltar que os dados elencados se referem apenas aos municípios que informaram o destino dado ao lodo das ETEs, ao IBGE de 2008.

Tabela 3. Principais destinos dos lodos de esgoto no Brasil e em suas diversas regiões.

REGIÃO	DESTINO DO LODO GERADO PELO PROCESSO DE TRATAMENTO DO ESGOTO							
		RIO	MAR	TERRENO BALDIO	ATERRO SANITÁRIO	INCINERAÇÃO	REAPROVEITAMENTO	OUTRO
BRASIL	(%)	13,4%	0,1%	8,0%	37,1%	1,6%	13,9%	26,0%
	(nº ETE com destino de lodo informado)	163	1	97	452	19	169	316
NORTE	(%)	12,9%	0,0%	12,9%	35,5%	0,0%	6,5%	32,3%
	(nº ETE com destino de lodo informado)	4	0	4	11	0	2	10
NORDESTE	(%)	14,6%	0,5%	21,1%	23,5%	7,0%	14,1%	19,2%
	(nº ETE com destino de lodo informado)	31	1	45	50	15	30	41
SUDESTE	(%)	17,8%	0,0%	5,9%	45,5%	0,6%	4,6%	25,5%
	(nº ETE com destino de lodo informado)	111	0	37	284	4	29	159
SUL	(%)	4,9%	0,0%	3,8%	24,5%	0,0%	36,2%	30,6%
	(nº ETE com destino de lodo informado)	13	0	10	65	0	96	81
CENTRO-OESTE	(%)	4,8%	0,0%	1,2%	50,0%	0,0%	14,3%	29,8%
	(nº ETE com destino de lodo informado)	4	0	1	42	0	12	25

Fonte: IBGE 2008

Como visto, o aterro sanitário é o método mais usual para a disposição final do lodo de esgoto no Brasil, sendo que este procedimento não prevê a utilização do lodo para qualquer finalidade útil. Hendges *et al.* (2020) elencam como pontos negativos ao uso do aterro sanitário seu elevado custo, a necessidade de estarem próximos aos centros urbanos, além desta prática contrariar a Política Nacional de Resíduos Sólidos, que prevê a não geração, redução, reutilização, reciclagem e disposição final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos. Ludovice e Fernandes (2007) ainda completam que o lodo confinado em células no aterro sanitário geram vários subprodutos, como o metano, um gás de efeito estufa.

Por outro lado, Tsutiya (2001) elenca a utilização dos aterros sanitários para absorver o lodo com características inadequadas ao uso, para a disposição de cinzas de incineração, sendo uma garantia de disposição final ambientalmente segura.

A disposição de lodo de esgoto em aterro pode ocorrer de duas formas: em aterros exclusivos ou na forma de codisposição com outros resíduos sólidos urbanos. Na primeira opção, o lodo é disposto na forma de tortas desidratadas, tendo teor de sólidos acima de 30%. Já na segunda opção, a mistura do lodo com os resíduos sólidos urbanos tende a acelerar o processo de biodegradação, devido ao teor de nitrogênio e também do potencial de inoculação

do lodo (LUDUVICE; FERNANDES, 2007).

De maneira global, Christodoulou e Stamatelatu (2016) elencam como as principais formas de disposição final do lodo de esgoto e biossólido no mundo: aterro sanitário, processamentos térmicos (incineração, pirólise, etc.) e uso agrícola. Em seu artigo de revisão sobre os diferentes tipos de disposição e reuso do biossólido, Collivignarelli *et al.* (2019) trabalham com quatro tipos: aterro sanitário, incineração, uso agrícola e outros usos.

A incineração é um processo de estabilização do lodo, que reduz significativamente seu volume, facilitando a disposição final. Luduvic e Fernandes (2007) apontam que através da combustão, a incineração do lodo implica na destruição de toda matéria orgânica, incluindo os organismos patogênicos. Segundo os autores, os produtos resultantes da combustão completa do lodo são: vapor de água, dióxido de carbono, dióxido de enxofre e cinza inerte, sendo que os gases liberados para a atmosfera devem ser regularmente monitorados, de modo a minimizar os impactos negativos. Uma outra preocupação destacada pela USEPA (1999) é a presença de metais que não se degradam ao longo do processo, se concentrando nas cinzas e no material particulado dos gases emitidos no processo. Essa técnica, que demanda cuidados operacionais sofisticados, é muito utilizada em países desenvolvidos (LUDUVICE; FERNANDES, 2007).

A utilização das cinzas resultantes do processo de incineração depende da qualidade do lodo incinerado. No Japão as cinzas são utilizadas como fertilizante (recuperação de fósforo), na indústria cimentícia, materiais de construção, entre outros (COLLIVIGNARELLI *et al.*, 2019; CHRISTODOULOU; STAMATELATOU, 2016). Devido ao alto custo de implantação e operação e à sofisticação do processo, a técnica da incineração é muito utilizada em países desenvolvidos (LUDUVICE; FERNANDES, 2007). Este processo representa 64% disposição final na Alemanha, 82% na Bélgica e 98% na Holanda (EUROSTAT, 2016), enquanto no Brasil ele é responsável por apenas 1,6% (IBGE, 2008).

Em contraponto ao aterro sanitário, o uso agrícola do biossólido se mostra uma opção coerente frente à Política Nacional de Resíduos Sólidos de 2010, uma vez que segue a hierarquia de gerenciamento de resíduos com a reciclagem agrícola do biossólido. Esta é uma alternativa promissora, pois se trata de um material com alto teor de matéria orgânica, com quantidades significativas de nitrogênio e fósforo (INGUNZA *et al.*, 2015). Dentre os benefícios agrônômicos desta prática estão a melhoria da estrutura e diminuição da densidade do solo, aumento da porosidade, da retenção de umidade e da condutividade hidráulica do solo, elevação da atividade microbiana, do teor de carbono orgânico e do CTC do solo (OJEDA; ALCANIZ; ORTIZ, 2003; SHARMA *et al.*, 2017).

Frente aos efeitos do uso do biofóssido nas propriedades globais do solo, fica evidente o erro de se qualificar um composto unicamente a partir de seu teor de nutrientes, sendo que muitos pesquisadores da área agrônômica afirmam que o adubo mineral alimenta as plantas, entretanto o fertilizante orgânico age de forma mais sistêmica, nutrindo as plantas e o solo (KIEHL, 2010).

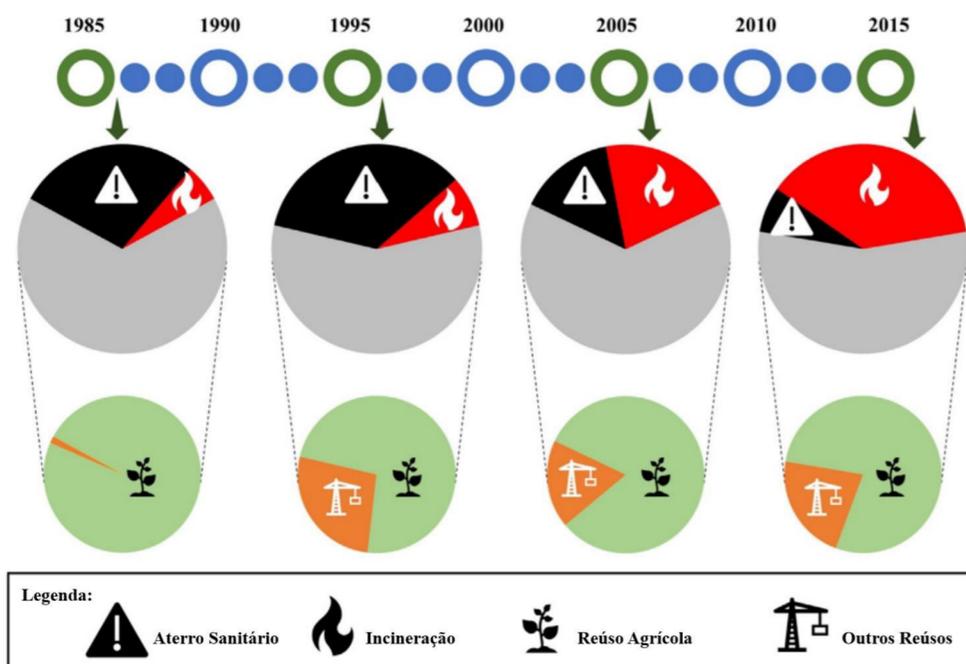
Segundo Andreoli, Pegorini e Fernandes (2001), há diversas formas de disposição final dos biofóssidos no solo, de acordo com a qualidade do mesmo, como por exemplo a reciclagem na agricultura, floricultura, silvicultura, paisagismo, recuperação de áreas degradadas, sendo possível ser utilizados também em parques e gramados. No entanto, para ser um processo bem-sucedido, é muito importante que a utilização agrônômica do biofóssido seja feita sem risco para a saúde dos trabalhadores e da população, garantindo também que não haja contaminação do solo e das águas subterrâneas. No Brasil, a Resolução nº 498 (CONAMA, 2020) define os critérios e procedimentos para produção e aplicação de biofóssido em solos, e dá outras providências sobre o assunto.

Seguindo as determinações presentes na Resolução CONAMA nº 498/2020, a aplicação do biofóssido uniformemente pode ser feita sobre a superfície do solo, em sulcos, em covas ou por injeção subsuperficial. Ingunza *et al.* (2015) recomendam que a incorporação do lodo em valas profundas é indicada em casos de adubação que antecede o plantio, já que a baixa concentração de oxigênio reduz, no biofóssido, a taxa de nitrificação e mineralização, diminuindo também a perda de nutrientes e a lixiviação de nitrato. Segundo os autores, quando o plantio já foi feito, é indicada uma adubação de cobertura e superficial com leve incorporação no solo, junto da planta.

Devido ao seu custo relativamente baixo e à reciclagem completa de nutrientes e matéria orgânica no solo, Wang *et al.* (2008) afirmam que o uso agrônômico do biofóssido internacionalmente tem desempenhado um papel significativo na disposição final. Os autores, no entanto, apontam para uma mudança nesse cenário, com a adoção de opções alternativas e a inserção de critérios de qualidade mais rígidos para uso de biofóssidos no solo, atribuindo a percepção e aceitação pública. De fato, Christodoulou e Stamatelatu (2016) analisam o caso da Alemanha, onde a percepção pública, juntamente com alguns fatores políticos, ocasionaram na redução gradual do uso agrícola do biofóssido desde a década de 1990, sendo que alguns estados alemães chegaram a banir esse resíduo. A recuperação de energia e nutrientes usando métodos térmicos (como a incineração) e químicos são melhores avaliados no país, que dispõe de uma economia forte e pode oferecer suporte a estas tecnologias sofisticadas, estando constantemente na vanguarda da pesquisa e desenvolvimento.

Sobre esta mudança de disposição final, Collivignarelli *et al.* (2019) compilaram os dados da União Europeia (Eurostat, 2019), reunidos na Figura 16. Nela fica evidente a diminuição do descarte em aterro sanitário, acompanhada pelo acréscimo significativo na incineração, sendo que o percentual de reuso do biossólido se manteve ao longo dos anos. O destino deste reuso também se alterou com o tempo, pois se em 1985 a principal solução de reaproveitamento estava focada no uso agrícola, representando 98,6%, em 2015 chegou a 78% (COLLIVIGNARELLI *et al.*, 2019).

Figura 16. Dados sobre descarte de biossólido na Europa em 1985, 1995, 2005 e 2015



Fonte: adaptado de Collivignarelli *et al.* (2019)

Ainda que seja identificada uma diminuição no uso agrícola do biossólido na União Europeia, ela ainda representa uma parcela significativa, se mostrando uma alternativa vantajosa a médio e longo prazos. Andreoli, Pegorini e Fernandes (2001) apontam a melhoria observada na qualidade do lodo, de modo a gerar um material com menor contaminação química e perfil sanitário melhorado. De fato, os autores afirmam que as principais limitações desta modalidade de disposição final estão ligadas aos riscos de contaminação do solo com metais pesados e agentes patogênicos, além da lixiviação de nitrogênio e fósforo, que podem contaminar o lençol freático e as águas superficiais.

Do ponto de vista ambiental, os metais pesados podem ser entendidos como

aqueles que oferecem risco à saúde humana e ao ambiente, quando em determinadas concentrações e tempo de exposição, sendo prejudicial à atividade dos organismos vivos (SILVA *et al.*, 2001). De acordo com Andreoli, Pegorini e Fernandes (2001), o conteúdo destes elementos no biossólido é, geralmente, maior do que o encontrado nos solos e, portanto, se faz necessário o acompanhamento constante de suas quantidades. Os autores destacam os efluentes industriais como a principal fonte de contaminação de metais pesados, se comparados aos efluentes domésticos, o que reforça a afirmação de Tayler (2018) e de Niwagaba, Mbéguéré e Strande (2014) de que a concentração de metal pesado normalmente não representa um problema no lodo fecal.

Outro ponto que deve ser observado para garantia da qualidade do biossólido que terá destino agrícola é a presença de poluentes orgânicos e contaminantes emergentes (fármacos, compostos de produtos de cuidado pessoal, entre outros). Segundo Andreoli, Pegorini e Fernandes (2001), poucos sintéticos orgânicos são susceptíveis à biodegradação, persistindo no lodo e nas águas residuárias, ao contrário dos materiais orgânicos naturais presentes no lodo bruto. Os autores descrevem estes poluentes como:

- a) Resistentes à degradação microbiana e, assim, relativamente estáveis no solo;
- b) De baixa solubilidade na água, apresentando mobilidade limitada no solo e, por isso, contribuindo para o acúmulo neste;
- c) Absorvíveis pelos seres vivos e acumulados em seus tecidos;
- d) Transferidos ao longo da cadeia alimentar, se acumulando nos elos superiores através do processo de biomagnificação;
- e) Muito tóxicos ao homem, podendo ser carcinogênicos, mutagênicos ou teratogênicos.

São exemplos de poluentes orgânicos os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAHs), policlorinato bifenil (PCBs), ftalatos (PAE), dibenzodioxinas policloradas e furanos (PCDD/Fs) e compostos perfluorados (PFCs) (LÜ *et al.*, 2021). Já os contaminantes emergentes podem ser ciprofloxacina, diclofenaco, azitromicina, ibuprofeno, galaxolide, tonalide, triclosan, entre outros (DUBEY *et al.*, 2021).

De acordo com Andreoli, Pegorini e Fernandes (2001), estas substâncias orgânicas, uma vez adicionadas ao solo junto ao lodo, podem sofrer volatilização, biodegradação ou ser decompostas pela energia solar por meio da foto-oxidação. Os autores colocam ainda uma ressalva com relação à habilidade de translocação destes compostos nos vegetais, uma vez que alguns compostos orgânicos tóxicos são absorvidos diretamente pelas raízes das plantas e translocados para a parte aérea pelos seus vasos capilares. Segundo Dubey

*et al.* (2021), a digestão anaeróbia e compostagem são processos bem-sucedidos no que tange a degradação de alguns poluentes orgânicos e contaminantes emergentes. No entanto, os autores ainda indicam que alguns compostos recalcitrantes não são removidos nestes processos, sendo mais adequada a utilização de ultrassom, ozonização e a hidrólise térmica nestes casos.

Para além de garantir as características de qualidade e segurança do biossólido, é importante ressaltar a atenção que se deve ter com as características ambientais do local onde ele será aplicado. Neste sentido, os fatores que apresentam maior risco são a contaminação de águas subterrâneas e águas de superfície, além do contato direto de pessoas e animais com o biossólido (ANDREOLI; PEGORINI; FERNANDES, 2001).

Para Sharma *et al.* (2017), as alternativas mais usuais para a disposição final são a agricultura, aterro sanitário e incineração. Além destas, o autor elenca outras formas de aproveitamento de lodos e biossólidos, utilizando como insumo para fabricação de produtos para rodovias e construção civil.

## **2.6 Aspectos normativos para o uso agrícola do biossólido no Brasil**

O uso benéfico do biossólido em solos se enquadra nos princípios de reutilização e reaproveitamento de resíduos, estando alinhado com a Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. A regulamentação que define os métodos de processamento, reuso e disposição final de biossólidos também estabelece os padrões de qualidade química e microbiológica, tendo como principal objetivo assegurar a proteção da saúde humana, por meio dos diferentes contatos diretos que possa haver.

No Brasil, o amparo legal para o aproveitamento do lodo de esgoto em solos, como já comentado anteriormente, é estabelecido pela Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) nº 498 de 2020, a qual define critérios e procedimentos para a produção e aplicação de biossólidos em solos. Os aspectos abordados na Resolução nº 498/2020 do CONAMA estão estruturados em:

- I . das disposições preliminares
- II . da qualidade do biossólido a ser destinado para uso em solos;
- III . do monitoramento e da caracterização do lote de biossólido para uso em solos;
- IV . das restrições de usos de biossólido em solos;
- V . das restrições locacionais para aplicação do biossólido;
- VI . das recomendações técnicas e das condições de uso de biossólido em solos;

- VII . da determinação da dose de aplicação de biossólidos em solos;
- VIII . do carregamento, transporte e aplicação;
- IX . do monitoramento das áreas de aplicação do biossólido;
- X . das responsabilidades;
- XI . das disposições finais.

Publicada em 19 de agosto de 2020, esta é uma versão atualizada da Resolução do CONAMA nº 375/2006, que passa a ser revogada. Dentre as principais diferenças entre as duas resoluções está a ampliação das oportunidades de uso em solo dos biossólidos Classe A e Classe B, na versão de 2020. Para tanto, o artigo nono da Resolução define:

Art 9º O biossólido a ser destinado para uso, em solos, será classificado em Classe A ou Classe B, de acordo com os requisitos definidos neste artigo.

§ 1º Para que o biossólido seja classificado como Classe A, deverá atender ao limite máximo de  $10^3$  *Escherichia coli* por grama de sólidos totais ( $g^1$  de ST) e ser proveniente de um dos processos de redução de patógenos descritos no Quadro 1, com a devida demonstração de atendimento dos respectivos parâmetros operacionais.

§ 2º Para que o biossólido seja classificado como Classe B, deverá atender ao limite máximo de dez elevada a sexta potência *Escherichia coli* por grama de sólidos totais ( $g^1$  de ST) ou ser proveniente de um dos processos de redução de patógenos descritos no Quadro 2, com a devida demonstração de atendimento dos respectivos parâmetros operacionais. (CONAMA, 2020, pág. 6)

Dessa forma, o biossólido é classificado como Classe A quando apresenta características de maior qualidade que o Classe B tendo, portanto, uso mais amplo e com menores restrições. A Resolução define que o biossólido Classe A pode ser utilizado sem restrições em florestas plantadas e para recuperação de solos e de áreas degradadas; além de produtos alimentícios que não entram em contato com o solo, em produtos alimentícios que não são consumidos crus e também em produtos não alimentícios (CONAMA, 2020). O Quadro 3 reúne os casos em que o uso do biossólido Classe A deve ser feito de maneira restritiva, bem como quando não há restrição de sua aplicação.

Quadro 3. Usos permitidos e suas restrições para Biossólido Classe A.

<i>USO</i>	<i>RESTRIÇÃO</i>
Cultivo de alimentos consumidos crus e cuja parte comestível tenha contato com o solo	Não aplicar o biossólido 1 mês antes do período de colheita
Pastagens e forrageiras	Não aplicar o biossólido 1 mês antes do período de colheita de forrageiras e do pastejo
Produtos alimentícios que não tem contato com o solo e ou que não são consumidos crus	Não há restrição para aplicação de biossólido
Produtos não alimentícios	Não há restrição para aplicação de biossólido
Florestas plantadas, recuperação de solos e de áreas degradadas	Não há restrição para aplicação de biossólido

Fonte: CONAMA 498/2020

No que diz respeito à Classe B de biossólidos, não há igualmente restrição para sua aplicação em florestas plantadas, recuperação de solos e de áreas degradadas. No entanto, a Resolução proíbe seu uso no cultivo de produtos alimentícios que possam ser consumidos crus. Caso a área tenha recebido a aplicação de biossólido Classe B, é indicado que o cultivo de alimentos consumidos crus ocorra apenas seis meses após esta aplicação (CONAMA, 2020). O Quadro 4 reúne os usos permitidos e suas restrições para o biossólido Classe B, bem como quando não há restrição de sua aplicação.

Quadro 4. Usos permitidos e suas restrições para Biossólido Classe B

<i>USO</i>	<i>RESTRIÇÃO</i>
Cultivo de produtos alimentícios que não sejam consumidos crus e produtos não alimentícios	Não aplicar o biossólido 4 meses antes do período de colheita
Pastagens e forrageiras	Não aplicar o biossólido 2 meses antes do pastejo. Não aplicar o biossólido 4 meses antes do período de colheita de forrageiras
Árvores frutíferas	Aplicação deve ser realizada após a colheita
Florestas plantadas, recuperação de solos e de áreas degradadas	Não há restrição para aplicação de biossólido
Cultivos de produtos alimentícios que possam ser consumidos crus	Proibida a utilização de biossólido

Fonte: CONAMA 498/2020

Para além dos parâmetros utilizados para classificar o biossólido em Classe A e Classe B (vide item 2.4.5 deste trabalho), a Resolução nº 498/2020 do CONAMA utiliza a

classificação Classe 1 e Classe 2 de acordo com as quantidades de substâncias químicas presentes no composto, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4. Valor máximo permitido de diversas substâncias químicas no bioossólido, para as Classes 1 e 2, segundo a legislação brasileira CONAMA 498/2020.

Substâncias químicas	Valor máximo permitido no bioossólido (mg/kg ST)	
	Classe 1	Classe 2
Arsênio	41	75
Bário	1300	1300
Cádmio	39	85
Chumbo	300	840
Cobre	1500	4300
Cromo	1000	3000
Merúrio	17	57
Molibidênio	50	75
Níquel	420	420
Selênio	36	100
Zinco	2800	7500

Fonte: CONAMA 498/2020

Para determinar a dose a ser aplicada de bioossólido nos solos, são apresentadas algumas fórmulas na Resolução, devendo ser adotado sempre o menor valor calculado. O CONAMA apresenta uma dosagem em toneladas de sólidos totais por hectare ( $t \text{ há}^{-1}$  de ST) para uso em solos e também para uso como condicionador de solos em áreas degradadas, respectivamente nos artigos 26 e 27 da Resolução. Para ambos os casos, são consideradas as aplicações de bioossólido Classe 1 ou Classe 2; Classe 1 ou Classe 2 tratados por processo alcalino; e por fim Classe 2, com suas restrições específicas.

Esta pesquisa se debruça na utilização do bioossólido proveniente de lodo fecal de esgoto exclusivamente doméstico, que pode ser classificado como Classe 1 devido à baixa presença de metais pesados geralmente característica dos lodos fecais (NIWAGABA; MBÉGUÉRÉ; STRANDE, 2014; TAYLER, 2018). De acordo com a Resolução nº 498/2020, para uso em solo do bioossólido Classe 1 a dosagem indicada não deve ultrapassar o quociente entre o teor de nitrogênio recomendado para a cultura e o teor de nitrogênio disponível no bioossólido (Equação 2).

$$DA = \frac{N_{rec}}{N_{disp}} \quad (2)$$

Na Equação 2, DA é a dose de aplicação de ST ( $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ); Nrec é o teor de Nitrogênio recomendado ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ); e Ndisp é o teor de Nitrogênio disponível ( $\text{kg}\cdot\text{Mg}^{-1}$ ).

A dosagem do bio sólido a ser aplicado em solos deve ser feita de tal forma que evite possíveis contaminações ambientais. Nessa perspectiva, é importante que o cálculo da dose de aplicação leve em consideração os critérios acima descritos, mas também considere as necessidades nutricionais dos cultivos em relação ao fornecimento de nutriente pelo bio sólido, bem como a quantidade disponível no solo (CONAMA, 2020).

Como exposto anteriormente, o bio sólido abordado pelo CONAMA na Resolução nº 498/2020 é o produto do tratamento do lodo de esgoto sanitário, não do lodo fecal. O seu artigo 3º define, inclusive, que lodos provenientes de sistema de tratamento individual, coletados por veículos, devem ser tratados em uma Unidade de Gerenciamento de Lodo (UGL) para que possam ser posteriormente reaproveitados em solo (CONAMA, 2020). Pereira *et al.* (2009) indicam que a utilização desta Resolução para bio sólidos de lodo fecal se dá principalmente porque, mesmo sendo uma problemática antiga no país, não há uma legislação específica para o uso do lodo fecal.

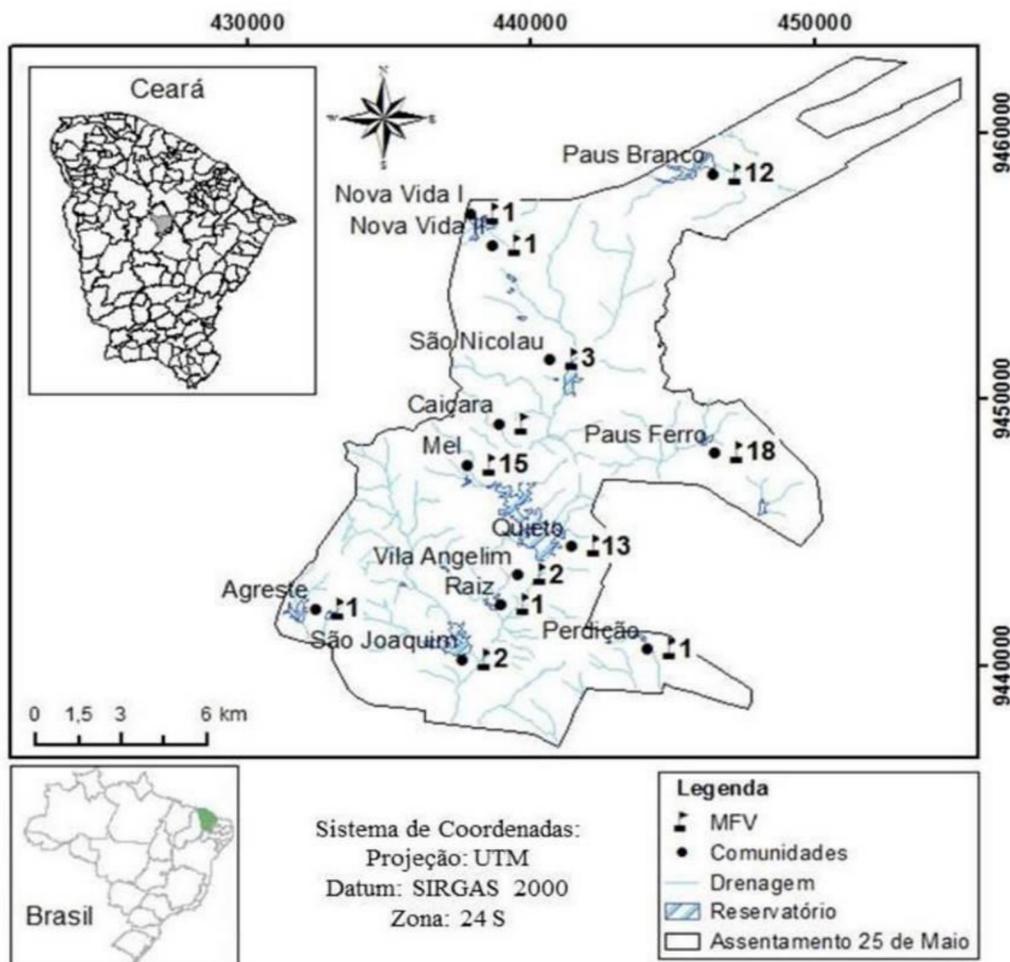
### 3 MATERIAL E MÉTODOS

A presente pesquisa utilizou como estudo de caso três unidades de fossas verdes do Assentamento de Reforma Agrária 25 de Maio (A25M). Localizado no município de Madalena, Ceará, o assentamento conta com cerca de 600 famílias organizadas em treze comunidades (Figura 17). Estas comunidades receberam intervenções de um grupo de pesquisadores da Universidade Federal do Ceará, da Universidade Estadual do Ceará e do Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária, com dois projetos de pesquisa-intervenção interdisciplinares. Um deles foi a elaboração de uma proposta de saneamento rural para a região semiárida, que foi implantada no A25M, intitulada Projeto Fossa Verde, financiado pelo CNPq. A proposta constitui uma experiência piloto com caráter inovador no semiárido nordestino com escassez hídrica, dialogando com a carência no setor de saneamento rural e se constituindo como uma tecnologia alternativa adaptada à realidade de populações assentadas em áreas de reforma agrária. Dessa forma, entre fevereiro de 2010 e fevereiro de 2013 foram construídas setenta fossas verdes (FV) no assentamento, com duas variações de tamanho: o tamanho padrão, com dimensões 2,0 m x 1,5 m x 1,0 m (comprimento x largura x profundidade, respectivamente), foi previsto para uma residência familiar média, com até seis moradores; enquanto o tamanho grande com 3,0 m x 2,0 m x 1,0 m (comprimento x largura x profundidade, respectivamente) foi previsto para os demais equipamentos sociais, como escolas, postos de saúde, entre outros (DE ARAÚJO; BRITO; SILVA, 2016). Para mais detalhes sobre a área de aplicação da presente pesquisa, sugere-se a leitura de Braga *et al.* (2019) e Zhang *et al.*, (2021).

O lodo fecal utilizado como objeto na presente pesquisa de mestrado é oriundo de fossas verdes que estavam em funcionamento desde sua construção e que nunca haviam sido esvaziadas, das comunidades Quieto e Paus Branco do A25M.

Em Quieto, foi analisado o lodo fecal (L1) de uma FV residencial (1 morador) de tamanho padrão, construída em 2010, com contribuição de água preta de um único vaso sanitário. Na comunidade de Paus Branco foi analisado o lodo fecal (L2) da FV do posto de saúde, com tamanho grande, construída em 2010 e com contribuição de água preta de um único vaso sanitário. Em Paus Branco também foi feita a análise do lodo fecal (L3) de uma FV residencial (4 moradores) de tamanho padrão, construída em 2010, com contribuição de água preta de um único vaso sanitário.

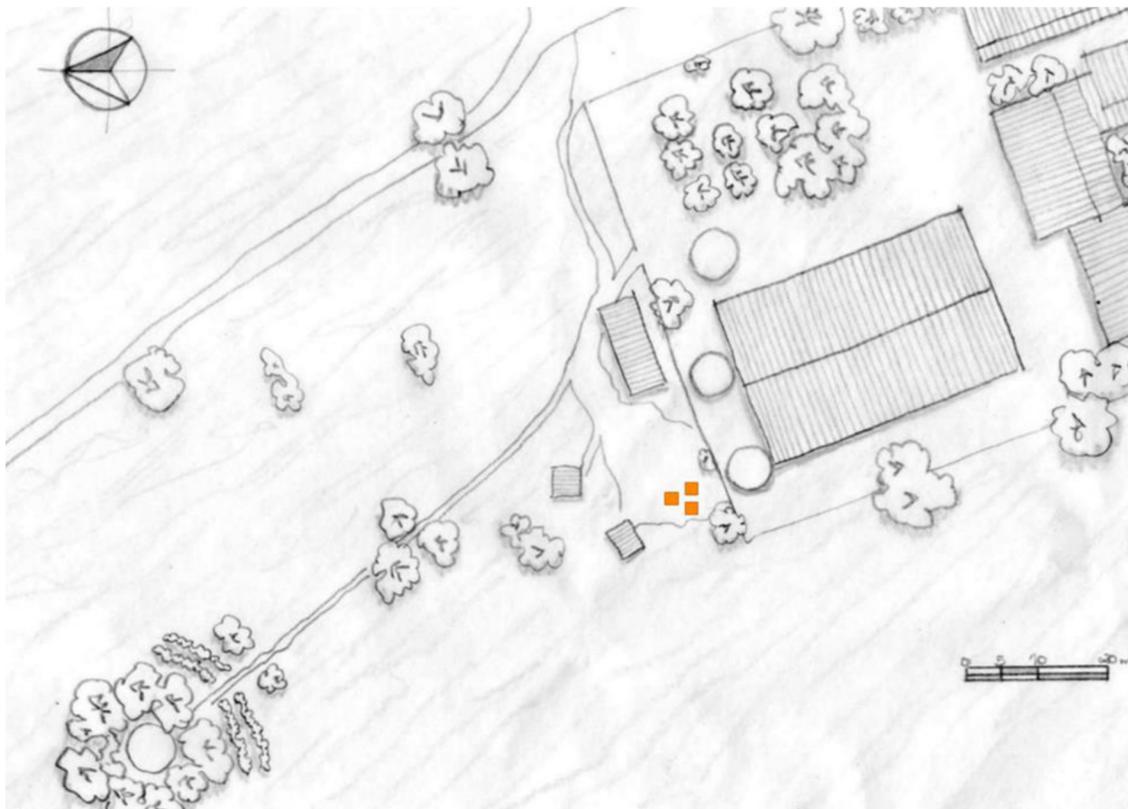
Figura 17. Localização do Assentamento 25 de Maio (A25M) em Madalena, Ceará, onde a presente pesquisa foi realizada. Identificam-se as diversas agrovilas que compõem o assentamento.



Fonte: Coelho, Reinhardt e de Araújo (2018).

A região onde se encontram as fossas verdes apresenta clima do tipo tropical quente semiárido com escassez de água na estação seca (mais proeminentemente entre julho e dezembro) e alta variabilidade interanual das chuvas, com precipitação pluviométrica média total de aproximadamente  $600 \text{ mm.ano}^{-1}$  e evaporação potencial de  $2.200 \text{ mm.ano}^{-1}$  (DE ARAÚJO; GONZALEZ PIEDRA, 2009). Foi registrada severa seca pluriannual de 2012 a 2017 na região, incluindo a área experimental dessa pesquisa (DE ARAÚJO; BRONSTERT, 2016; ZHANG *et al.*, 2021). Segundo dados do INMET, no período de 1981 a 2010, a temperatura registrada foi maior ou igual a  $30^{\circ}\text{C}$  em 332 dias do ano, e de maior ou igual a  $35^{\circ}\text{C}$  durante 117 dias do ano.

Figura 18. Implantação dos canteiros de secagem no Canteiro Experimental da Escola João Sem Terra do Assentamento 25 de Maio, Madalena, Ceará, 2021.



Fonte: o autor (2022).

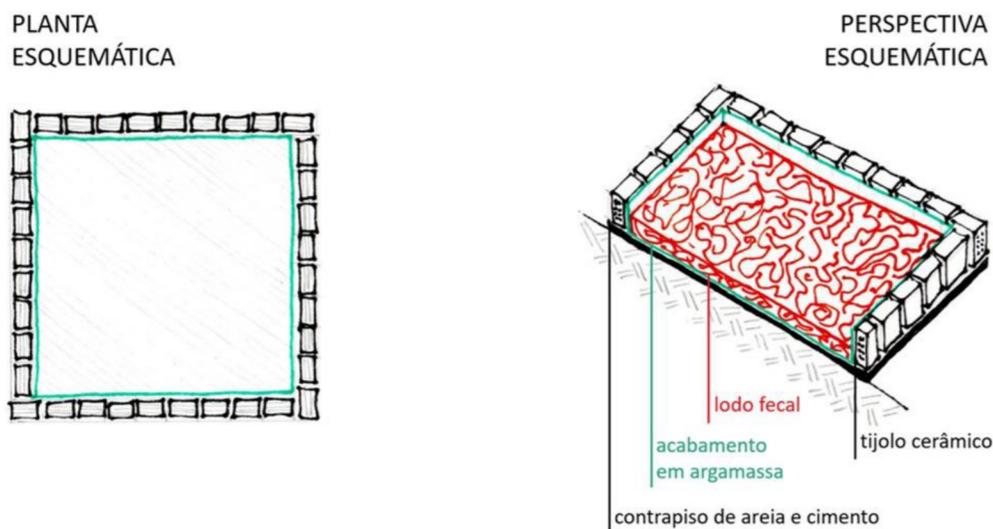
As fossas analisadas foram esvaziadas de forma manual, como mostrado na Figura 19, e o lodo fecal foi transportado por uma pick-up para três canteiros de secagem individuais, construídos no canteiro experimental da Escola João Sem Terra do A25M (figura 18). Com área superficial de 2,9 m<sup>2</sup> cada, os três canteiros foram construídos conforme indicado na Figura 20, com fundo plano (sem declividade) e tendo paredes laterais e fundo impermeabilizados com argamassa.

Figura 19. Esvaziamento manual de uma Fossa Verde no Assentamento 25 de Maio, Madalena, Ceará, 2021.



Fonte: o autor (2022).

Figura 20. Esquema dos canteiros de secagem individuais construídos na pesquisa.



Fonte: o autor (2022).

Durante toda a pesquisa estes canteiros de secagem ficaram descobertos e expostos à radiação solar, com o objetivo de elevar a temperatura e higienizar o lodo fecal. Cada canteiro foi equipado com sensores inseridos no lodo fecal para monitorar a temperatura do material, com armazenamento de dados a cada 10 min (*Datalogger Elitech RC-51*). No que diz respeito aos dados da região, como temperatura, umidade relativa do ar e precipitação pluviométrica, estes foram obtidos a partir dos dados aferidos de outubro a dezembro de 2020 por estação meteorológica convencional localizada em Quixeramobim (identificador 82586), disponíveis no banco de dados meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (2021). A estação meteorológica encontra-se distante 40 km do local do experimento, porém, entre as duas localizações há homogeneidade climática (ALENCAR; DE ARAÚJO; TEIXEIRA, 2020).

O período de monitoramento foi de 45 dias, entre outubro e dezembro de 2020, durante o período de estiagem da região, quando a evapotranspiração potencial é da ordem de 5 a 7 mm diários. O revolvimento dos lodos fecais foi realizado com enxada de forma manual, com a frequência de três vezes por semana durante todo o período da pesquisa. Para análise laboratorial, as amostragens dos lodos fecais foram realizadas em quatro pontos superficiais dos canteiros de secagem, formando uma amostra composta, com frequência de coleta quinzenal.

Dessa forma, as coletas foram realizadas nos tempos 1, 15, 30 e 45 dias a partir da disposição dos lodos fecais nos canteiros de secagem (Figura 21). As amostras foram acondicionadas em embalagens estéreis e armazenadas (refrigeradas) em caixas de isopor de modo a manter a temperatura em torno de 4°C até a chegada no laboratório. Os ensaios foram realizados no Laboratório do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará - LABOSAN-UFC.

Figura 21. Monitoramento dos parâmetros de lodo fecal de uma Fossa Verde em tratamento no Assentamento 25 de Maio, Madalena, Ceará, 2021.



Fonte: o autor (2022)

A análise físico-química do lodo fecal foi feita pela determinação de alguns parâmetros durante o processo de higienização. Nessa perspectiva, foram realizados ensaios de sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV/ST) e sólidos fixos (SF/ST) pelo método gravimétrico para amostras sólidas e semissólidas conduzido de acordo com os procedimentos (2540 G.) descritos em APHA (2017), sendo que todos os resultados foram apresentados em relação ao peso seco do material analisado. Já a umidade (U) foi calculada pela Equação 3, indicada por Von Sperling e Gonçalves (2001). No que diz respeito ao parâmetro microbiológico, foi utilizado o método do substrato cromogênico Quanti-Tray / 2000 Colilert IDEXX para quantificação do Número Mais Provável (NMP) por gramas de ST de *Escherichia coli*, usando a metodologia Kramer e Liu (2002) até a diluição A ( $1 \times 10^{-3}$ ). Os resultados referentes a *E. coli* foram apresentados em log de NMP / g de ST.

$$U (\%) = 100 - ST (\%) \quad (3)$$

Para a análise estatística dos dados obtidos, o parâmetro SV / ST foi submetido à análise de variância (ANOVA) seguido pelo teste de Tukey com 5% de probabilidade para comparação entre os três canteiros de secagem, utilizando o programa *Past* (versão 4.03); no que diz respeito à temperatura, utilizou-se a análise estatística com o diagrama de caixas (*boxplot*) usando o suplemento de excel *Real Statistics*.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No início do experimento (outubro de 2020), o lodo fecal das fossas verdes apresentava consistência sólida (Figura 22), com teor médio de umidade de 54%, 28% e 67%, respectivamente em L1, L2 e L3. Houve uma significativa perda de umidade em todos os lodos fecais no intervalo de 15 dias, atingindo valores inferiores a 2%, que se mantiveram até o final da higienização. Na Tabela 5 pode ser verificada a redução na umidade acompanhada pelo aumento dos sólidos totais dos lodos fecais analisados.

Figura 22. Aspecto de lodo fecal extraído de uma Fossa Verde com dez anos de uso em Madalena, Ceará, 2021.



Fonte: o autor (2022).

Em relação aos valores de sólidos voláteis, no início do experimento L1 e L3 (residencial) estavam com SV respectivamente abaixo de 21% e 39%. Ambos apresentaram pequena redução de SV ao longo dos 45 dias de higienização, chegando L1 a 18% e L3 a 34% de SV. Quanto aos valores para L2 (posto de saúde), durante todo o processo de higienização os teores de SV permaneceram em torno de 6%, como pode ser visto na Tabela 5.

Tabela 5. Parâmetros físico-químicos de três módulos (L1, L2, L3) de lodo fecal de Fossa Verde do Assentamento 25 de Maio, Madalena, Ceará, 2021.

LODO DE FOSSA VERDE	DATA	TEMPO (dias)	UMIDADE (%)	SÓLIDOS TOTAIS (%)	SÓLIDOS VOLÁTEIS (%)	SÓLIDOS FIXOS (%)
L 1	27/10/2020	1	53,95 ± 1,57	46,05 ± 1,57	20,51 ± 3,61	79,49 ± 3,61
	11/11/2020	15	1,43 ± 0,03	98,57 ± 0,03	21,09 ± 0,89	78,91 ± 0,89
	26/11/2020	30	1,88 ± 0,62	98,12 ± 0,62	17,43 ± 1,51	82,57 ± 1,51
	11/12/2020	45	1,64 ± 0,31	98,36 ± 0,31	17,93 ± 0,44	82,07 ± 0,44
L 2	27/10/2020	1	27,58 ± 1,08	72,42 ± 1,08	5,91 ± 0,68	94,09 ± 0,68
	11/11/2020	15	0,71 ± 0,03	99,29 ± 0,03	6,69 ± 0,33	93,30 ± 0,33
	26/11/2020	30	0,94 ± 0,03	99,06 ± 0,03	5,98 ± 0,79	94,02 ± 0,79
	11/12/2020	45	0,72 ± 0,02	99,28 ± 0,02	5,61 ± 0,40	94,39 ± 0,40
L 3	27/10/2020	1	66,93 ± 1,25	33,07 ± 1,25	38,74 ± 5,20	61,26 ± 5,20
	11/11/2020	15	1,96 ± 0,11	98,04 ± 0,11	41,06 ± 3,73	58,94 ± 3,73
	26/11/2020	30	2,95 ± 0,31	97,05 ± 0,31	29,76 ± 0,96	70,24 ± 0,96
	11/12/2020	45	2,18 ± 0,23	97,82 ± 0,23	33,91 ± 0,54	66,09 ± 0,54

Fonte: o autor (2022).

Sobre a qualidade microbiológica dos lodos fecais no início do processo de higienização nos canteiros de secagem, foram verificados valores de *E. coli* entre 5 e 6 log de NMP/g de ST. De acordo com a Tabela 6, observa-se que para L2 e L3 foram retirados lodos das fossas verdes com níveis microbiológicos compatíveis com bioestabilizado Classe B (menor que 6 log de *E. coli*), enquanto para L1 atingiu-se esse nível com 15 dias de higienização. O tempo necessário de higienização para que os lodos passassem da Classe B para a Classe A de bioestabilizado (menor que 3 log de *E. coli*) foi de 15, 30 e 45 dias respectivamente para L3, L1 e L2.

Tabela 6. Parâmetros microbiológicos de três módulos (L1, L2, L3) de lodo fecal de Fossa Verde do Assentamento 25 de Maio, Madalena, Ceará, 2021.

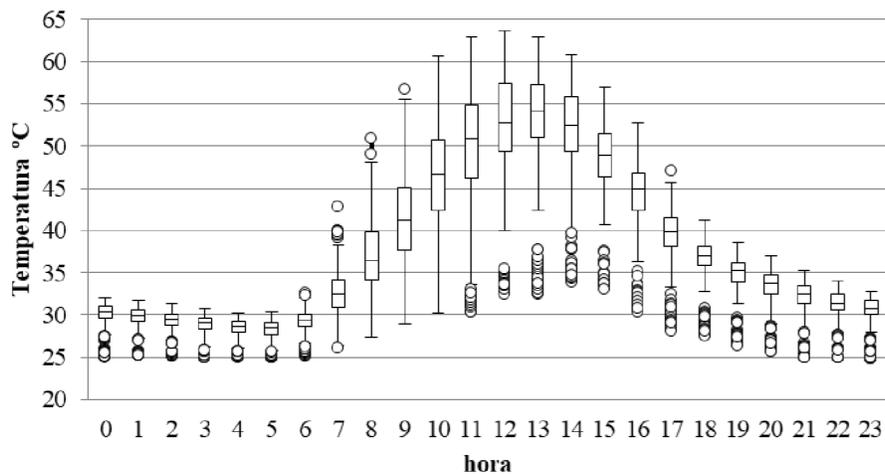
LODO DE FOSSA VERDE	DATA	TEMPO (dias)	<i>E. Coli</i> log NMP/gST	QUALIDADE MICROBIOLÓGICA
L 1	27/10/2020	1	6,1	-
	11/11/2020	15	4,4	classe B
	26/11/2020	30	< 3,0	classe A
	11/12/2020	45	< 3,0	classe A
L 2	27/10/2020	1	5,1	classe B
	11/11/2020	15	5,4	classe B
	26/11/2020	30	3,6	classe B
	11/12/2020	45	< 3,0	classe A
L 3	27/10/2020	1	5,5	classe B
	11/11/2020	15	< 3,0	classe A
	26/11/2020	30	< 3,0	classe A
	11/12/2020	45	< 3,0	classe A

Fonte: o autor (2022).

De maneira individual, os dados armazenados em *datalogger* para cada um dos canteiros de secagem (referente a L1, L2 e L3) foram plotados em diagramas de caixas discretizados por hora. Nos três gráficos (Figuras 23, 24 e 25) referentes ao período completo de monitoramento, nota-se que todos apresentaram uma oscilação da temperatura semelhante ao longo das 24 horas:

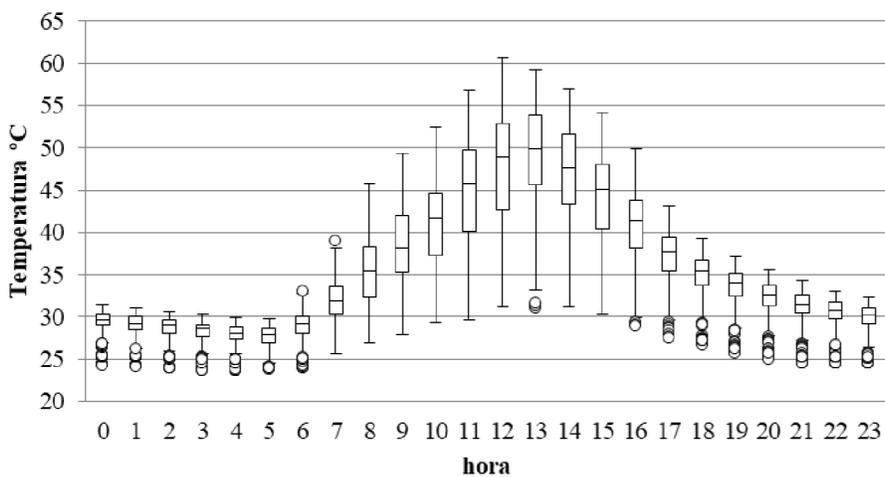
- a) um pequeno decréscimo durante o intervalo de 0 a 6 horas, com temperatura mediana em torno de 29°C para todos os lodos fecais analisados;
- b) por volta das 6h ocorre uma inflexão na curva com aumento repentino até atingir o máximo de 64°C, 61°C, e 63°C respectivamente para L1, L2 e L3, que ocorre em torno das 12 horas;
- c) os valores obtidos através da mediana às 12 horas foram 54°C, 50°C e 53°C, respectivamente para L1, L2 e L3;
- d) por fim, foi observada uma diminuição gradual na curva até a estabilização em todos os lodos fecais analisados, que ocorre por volta das 23 horas com um valor mediano de 30°C.

Figura 23. Variação da temperatura de L1 para o período completo de monitoramento.



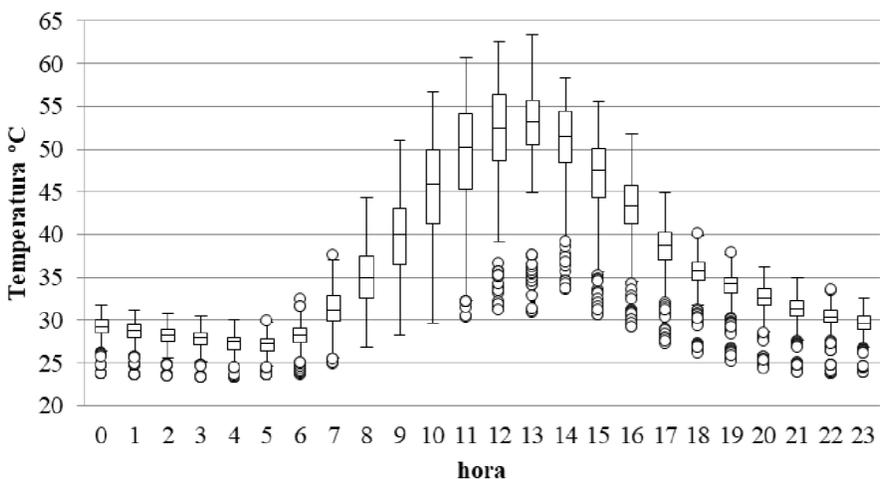
Fonte: o autor (2022).

Figura 24. Variação da temperatura de L2 para o período completo de monitoramento.



Fonte: o autor (2022).

Figura 25. Variação da temperatura de L3 para o período completo de monitoramento.



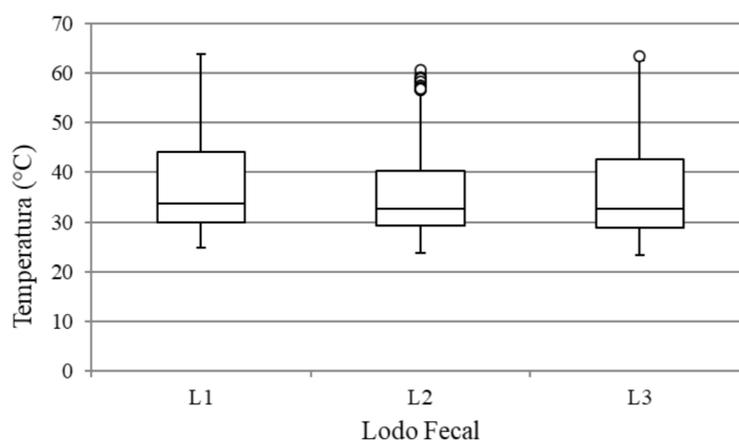
Fonte: o autor (2022).

De forma geral, as temperaturas obtidas para L1, L2 e L3 durante o experimento foram muito satisfatórias, com valores máximos de 61°C a 64°C por volta das 12 horas, principalmente considerando o fato de que os canteiros de secagem estiveram descobertos durante toda a pesquisa. Em comparação com lodo de esgoto de ETE higienizado em estufas agrícolas, em Franca (SP) Comparini (2001) observou temperaturas tanto para o início do dia (0 a 6 horas) quanto no final do dia (a partir das 22 horas) com valores médios em torno de 20°C. Em Viçosa (MG), as pesquisas de Dias (2012) indicam um comportamento gráfico semelhante, mas com valores distintos, sendo que no início e no final do dia os valores permanecem em torno de 25°C.

Analisando a amplitude interquartil nas Figuras 23, 24 e 25 é possível notar que 50% dos dados se encontram no intervalo de 49°C a 57°C para L1, 42°C a 53°C para L2 e 49°C a 56°C para L3. Dessa maneira, é possível inferir que L2 ficou exposto a temperaturas inferiores em relação a L1 e L3 e, conseqüentemente, necessitou de maior tempo de exposição solar para atingir a qualidade microbiológica Classe A, como já foi visto na análise dos seus parâmetros microbiológicos (Tabela 6).

No período experimental, a temperatura média da massa de L1, L2 e L3 (37°C, 35°C e 36°C) se manteve pouco mais elevada em comparação à temperatura média ambiente (31°C). Como pode ser observado no diagrama de caixas da Figura 26, as temperaturas mínimas de L1, L2 e L3 foram respectivamente 25°C, 24°C e 23°C. Os dados do INMET indicaram temperatura ambiente média mínima de 22°C, média de 31°C e média máxima de 37°C nos meses do experimento.

Figura 26. Temperatura dos lodos fecais nos canteiros de secagem no Assentamento 25 de Maio, Madalena, Ceará, 2021.



Fonte: o autor (2022).

De acordo com Lupatini *et al.* (2009), o lodo fecal com origem de fossa séptica apresenta algumas limitações para ser tratado como resíduo sólido, sendo necessárias etapas preliminares à higienização, como a separação entre as frações sólidas e líquidas do material (adensamento e desaguamento). No que diz respeito ao lodo fecal oriundo de fossas verdes, o experimento realizado indicou uma situação favorável ao tratamento do mesmo, uma vez que o material acumulado e retirado com dez anos de residência apresentou consistência sólida com ST superior a 30%, dispensando as diversas etapas preliminares à higienização.

A estratégia adotada nesta pesquisa para a higienização do lodo fecal por meio de canteiros de secagem sem cobertura e expostos diretamente à radiação solar, revolvidos manualmente três vezes na semana, proporcionou a redução significativa da umidade dos lodos fecais analisados. Pedroza *et al.* (2006) indicam a importância de obtenção da umidade final abaixo de 10% como forma de redução de patógenos. Com apenas 15 dias de higienização, L1, L2 e L3 atingiram valores de umidade inferiores a 2%, demonstrando as potencialidades das condições climáticas do semiárido cearense no período de estiagem para a higienização usando a exposição solar. A Figura 27 demonstra a consistência do lodo fecal do Posto de Saúde (Comunidade Paus Branco) com 30 dias de higienização.

Figura 27. Aspecto da consistência do lodo fecal do Posto de Saúde de Paus Branco após 30 dias de higienização. Assentamento 25 de Maio, Madalena, Ceará, 2021.



Fonte: o autor (2022).

Em comparação com lodo de esgoto de ETE higienizado em estufas agrícolas, em Franca (SP), Comparini e Além Sobrinho (2002) constataram média de 70 dias de tratamento para alcançarem teores de umidade menores que 10% em lodo de esgoto. Já em Viçosa (MG),

as pesquisas de Dias (2012) e também de Oliveira *et al.* (2018) reportaram que apenas em 75 e 60 dias, respectivamente, a umidade havia alcançado o valor igual ou inferior a 10%.

A Resolução CONAMA nº 498 / 2020 estabelece que a fração orgânica estabilizada do biossólido deve ser comprovada por uma relação SV / ST menor que 0,65. Os dados desta pesquisa indicam a Fossa Verde como um processo bem-sucedido de estabilização para o lodo fecal, uma vez que o material retirado das três fossas analisadas apresentava, já de início, relação SV / ST inferior a 0,40.

Considerando os dados da Tabela 5, a ANOVA seguida de Tukey ( $p \leq 0,05$ ) demonstra que os valores iniciais de SV dos três lodos são estatisticamente diferentes, principalmente considerando-se L2 (5,9%) frente a L1 (20,5%) e L3 (38,7%). Uma das relações possíveis para essa variação pode ser atribuída ao fator demográfico. Ambos L1 e L3 têm origem em fossas verdes residenciais, com um e quatro moradores respectivamente, com contribuição de água preta de um vaso sanitário. Já o lodo L2 é originário da Fossa Verde de um posto de saúde, tendo igualmente contribuição de água preta de um vaso sanitário. Nessa perspectiva, o número de usuários e a frequência de uso dos sanitários é diferente em uma residência de um único morador e de quatro moradores, tanto quanto de um posto de saúde. Para além dessa diferença, Krueger, Fowler e Templeton (2021) ressaltam que a variação de composição do lodo fecal é muito influenciada pelos fatores técnicos (como detalhes e tipo do sistema de tratamento utilizado), ambientais (como clima e temperatura), além dos aspectos culturais e socioeconômicos do local (como hábitos alimentares e higiene dos usuários).

No processo de higienização do lodo fecal, as variáveis de controle tempo e temperatura agem em conjunto na redução dos microrganismos patogênicos, de modo que, quanto maior a temperatura, menor o tempo necessário de permanência do lodo para inativação dos patógenos (BASSAN; DODANE; STRANDE, 2014). A partir disso, o parágrafo 1º do artigo 9º da Resolução CONAMA nº 498 / 2020 indica que o lodo deve atender ao limite máximo de 3 log de *E. coli* por grama de ST, com a devida demonstração de atendimento desse parâmetro. Usando o processo de higienização nos canteiros de secagem, para L1 e L3 foi alcançado o valor indicado pelo CONAMA dentro do período de 30 e 15 dias, respectivamente. Já para L2, foram necessários 45 dias para atingir o limite de *E. coli* exigido pela Resolução. O baixo tempo de higienização pode ser correlacionado com a associação entre elevadas temperaturas (Figura 26) e ausência de chuvas observadas no Semiárido Brasileiro na estação seca.

Além de estabelecer o limite máximo de *E. coli*, o parágrafo 1º do artigo 9º da Resolução CONAMA nº 498 / 2020 indica seis processos de redução de patógenos para

obtenção de biossólido Classe A. Para esta pesquisa foi utilizado o Regime A da Alternativa 1, no qual é exigido um lodo com no mínimo 7% de ST e que tenha tido sua temperatura mantida igual ou acima de 50°C por no mínimo 20 minutos em 13,2 dias. Durante o processo de higienização, o acompanhamento das temperaturas dos lodos fecais indicou que todos corresponderam à exigência, mantendo a temperatura de 50°C durante 20 minutos em 37 dias para L1, 26 dias para L2 e 38 dias para L3.

Os níveis microbiológicos de L2 e L3, quando retirados das fossas verdes, são compatíveis com o biossólido Classe B, tendo *E. coli* menor que 6 log de NMP/g de ST (o valor apresentado por L1 foi de 6,1). Esses valores estão em consonância com os obtidos na relação SV / ST, que indicaram que L1, L2 e L3 já se encontravam estabilizados no início da pesquisa. A higienização dos lodos fecais no Semiárido Brasileiro, com revolvimento manual, mostrou ser um processo muito eficiente considerando os indicadores patogênicos obtidos. De fato, foi observada a redução nas contagens de *E. coli* atingindo os valores indicados para biossólido Classe A com 15 a 45 dias de higienização. Em sua pesquisa, Santos *et al.* (2017) realizaram o processo de tratamento do lodo de esgoto de reator UASB através do uso de leitos de secagem descobertos na cidade de Feira de Santana (BA). A pesquisa, entretanto, teve baixa inativação dos microrganismos durante os 90 dias de tratamento, tendo atingido 3,66 e 3,50 log de NMP/g de ST de Coliformes Termotolerantes sendo, portanto, considerado Classe B. Em Franca (SP), Comparini e Além Sobrinho (2002) pesquisaram a higienização de lodo de esgoto de lodos ativados, previamente desaguado por filtro prensa. Os autores alcançaram concentração de *E. coli* correspondente ao padrão Classe A dentro do período de 70 dias em estufa agrícola. Dias (2012) analisou a higienização de lodo de esgoto de um reator UASB em Viçosa (MG), previamente desaguado em um leito de secagem e posteriormente transferido para estufa agrícola. O autor reportou ter atingido os níveis para padrão Classe A em 45 dias para quatro lotes da pesquisa e 75 dias para outros três lotes.

Ainda que não tenha sido um dos objetivos deste mestrado, a abertura das fossas verdes gera dados interessantes que podem corroborar com a ampliação do seu uso e da boa manutenção do sistema. Os dados referentes à produção dos lodos L1, L2 e L3 estão computados na Tabela 7 e foram obtidos da abertura das fossas verdes e esgotamento dos seus respectivos lodos fecais acumulados durante 10 anos. É importante ressaltar que o número de habitantes que consta na tabela diz respeito ao ano de 2020, não tendo sido consideradas as variações de moradores ao longo do tempo.

Tabela 7. Produção de lodo fecal nas fossas verdes abertas e esgotadas no Assentamento 25 de Maio, Madalena, Ceará, 2020.

LODO DE FOSSA VERDE	NÚMERO DE HABITANTES	VOLUME TOTAL (L)	MASSA TOTAL (Kg)	PRODUÇÃO PER CAPITA (L/hab.ano)	PRODUÇÃO PER CAPITA (Kg ST/hab.ano)
L 1	1	20	24,6	2,0	1,1
L 2	-	84	104,9	-	-
L 3	4	18	20,4	0,5	0,2

Fonte: O autor (2022).

Mesmo com uma variação significativa de volume entre os lodos fecais analisados (sendo L2 oriundo de uma Fossa Verde de tamanho grande de um posto de saúde), é possível notar a baixa quantidade encontrada, tendo em vista o longo período de produção e acumulação dos mesmos. No que diz respeito ao lodo de esgoto, Dotro *et al* (2017) afirmam que a produção per capita varia de acordo com o país, sendo que o intervalo encontrado é de 0,1 a 30 kg ST/ hab.ano. Mills, Blacket e Tayler (2014) avaliaram o lodo fecal de 107 fossas, sendo que desse total 83% era referente a fossa rudimentar, e a produção per capita média aferida foi de 25 L/hab.ano. Por fim, as pesquisas de Norris (2000) na África do Sul apontam a produção de 25,5 L/hab.ano para fossas secas e 29,2 L/hab.ano para as fossas sépticas. Em comparação com estes estudos, os dados encontrados com produção per capita de 0,5 L/hab.ano (L3) e 2,0 L/hab.ano (L1) indicam a potencialidade da Fossa Verde como um sistema com baixa produção de lodo fecal e, portanto, baixa demanda de operação e manutenção.

## 5 CONCLUSÕES

Realizaram-se experimentos, com três repetições, visando à higienização do lodo fecal de Fossas Verdes com dez anos de uso contínuo no Semiárido Brasileiro. Os experimentos foram realizados com lodo fecal de três unidades de Fossa Verde durante a estação de estio (outubro a dezembro) do ano de 2020, através da exposição solar em canteiros de secagem descobertos. As três fossas tinham dez anos de uso ininterruptos no momento da coleta das amostras e nenhuma delas tinha sido esgotada antes dos experimentos serem realizados.

Dos resultados da presente pesquisa, considerando-se as condições em que foram realizadas, pode-se concluir que:

- a) o lodo fecal já apresentava, no ato de coleta das amostras, consistência sólida com teor de sólidos totais superior a 30%, dispensando as diversas etapas preliminares à higienização. Isso se deveu, entre outros, ao longo tempo de residência do lodo dentro da unidade (uma década);
- b) quinze dias de higienização foram suficientes para que a umidade do lodo atingisse valores inferiores a 2%, demonstrando as potencialidades da estação seca do semiárido para a higienização do lodo através da exposição solar;
- c) a técnica de higienização, de simples manejo, demonstrou ser eficiente para reduzir o teor de patógenos em níveis seguros para uso agrícola;
- d) em até 45 dias de higienização, todas as amostras de lodo fecal atingiram o critério microbiológico de *E. coli* menor que 3 log de NMP/g de ST, podendo ser classificadas como biossólido Classe A, de acordo com a Resolução CONAMA nº 498/2020;
- e) a combinação de altas temperaturas e baixa frequência de remoção do lodo fecal (uma década) indica que a Fossa Verde realiza o tratamento do lodo fecal;
- f) o uso da Fossa Verde no meio rural no semiárido brasileiro é recomendado tendo em vista a simplicidade de construção do sistema (já demonstrada em trabalhos anteriores) e as condições favoráveis de operação e manutenção aqui confirmadas.

A partir dos resultados da presente pesquisa, recomendam-se os seguintes temas para eventuais pesquisas posteriores.

- a) realizar a higienização em canteiros de secagem sob as mesmas condições climáticas (estação de estio da região semiárida) alterando a frequência do revolvimento do lodo fecal de FV (ou até mesmo não a realizar);
- b) fazer o esgotamento do lodo fecal de FV com um menor tempo de residência, mas sob as mesmas condições climáticas do semiárido (por exemplo, 5 anos);
- c) realizar a retirada do lodo fecal de FV com o mesmo período de residência, mas sob condições climáticas diversas (por exemplo, em clima subtropical ou equatorial);
- d) por fim, extrair o lodo fecal de módulos de fossas verdes alterando tanto as condições climáticas como a condição temporal e comparar, com um banco de dados unificado, os diferentes teores de sólidos totais e a qualidade microbiológica do lodo fecal de FV recém retirado e pós higienização.

## REFERÊNCIAS

- ALENCAR, P. H. L.; DE ARAÚJO, J. C.; TEIXEIRA, A. S. Physically based model for gully simulation: application to the Brazilian semiarid region. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 24, p. 4239-4255, 2020.
- ALVES, P. V.; QUERINO, C.A.S.; RIZZUTI, B.F.; VAZ, M.A.B.; QUERINO, J.K.A.S. PINHO, J.A.N. A importância do conceito da radiação solar na educação básica: a percepção de alunos do ensino médio sobre a temática. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 43, 2021.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION ASSOCIATION - APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 23 ed. Washington: American Water Works Association & Water Environment Federation, 2017.
- ANDRADE NETO, C. O. Sistemas Simples para Tratamento de Esgotos Sanitários: Experiência Brasileira. Rio de Janeiro: ABES, 1997.
- ANDRADE, C.F.; VON SPERLING, M.; MANJATE, E.S. Treatment of septic tank sludge in a vertical flow constructed wetland system, *Eng. Agr.*, v. 37, n.4, p. 811–819, 2017.
- ANDREOLI C.V.; CARVALHO E.H.; MEYER S.A.S. Lodos de Fossa e Tanques Sépticos no Brasil. *In: CARVALHO E.H.; ANDREOLI C.V. (org.). Lodos de Fossa e Tanque Séptico: orientações para definição de alternativas de gestão e destinação.* Curitiba: ABES, 2015.
- ANDREOLI, C.V.; PEGORINI, E.S.; FERNANDES, F. Disposição do lodo no solo. *In: ANDREOLI, C.V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. Lodo de esgoto: tratamento e disposição final.* Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental-UFMG; Curitiba: Companhia de Saneamento do Paraná, 2001.
- ARIAS, C.A. Current state of decentralized waste water treatment technology in Denmark. *In: EPA International Symposium on Domestic Wastewater Treatment and Disposal Systems.* Dublin: Trinity College, p. 1-12, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 13969: Tanques sépticos – Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos – Projeto, construção e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7229: Construção e instalação de fossas sépticas e disposição dos efluentes finais. Rio de Janeiro: ABNT, 1982.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7229: Norma para construção e instalação de fossas sépticas. Rio de Janeiro: ABNT, 1963.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7229: Projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos. Rio de Janeiro: ABNT, 1993.
- ASTALS, S.; VENEGAS, C.; PECES, M.; JOFRE, J.; LUCENA, F.; MATA-ALVAREZ, J. Balancing hygienization and anaerobic digestion of raw sewage sludge. *Water Res.*, v. 46, p. 6218-6277, 2012.

BALDOTTO, M. A.; BALDOTTO, L. E. B. Ácidos Húmicos. *Rev. Ceres*, v. 61, p. 856–881, 2014.

BASSAN, M.; DODANE, P.H.; STRANDE, L. Treatment Mechanisms. *In*: STRANDE, L.; RONTELTAP, M.; BRDJANOVIC, D. *Faecal Sludge Management: Systems Approach for Implementation and Operation*. Londres: IWA, 2014.

BASSAN, M.; TCHONDA, Y.L.; ZOELLIG, H.; MAHAMANE, M.; MBÉGUÉRE, M.; STRANDE, L. Characterization of faecal sludge during dry and rainy seasons in Ouagadougou, Burkina Faso. *In*: WEDC International Conference, 36.,2013, Nakuru. *Anais[...]*Dubendorf: EAWAG, 2013. p. 1-7.

BITTENCOURT, S.; AISSE, M. M.; SERRAT, B. M. Gestão do uso agrícola do lodo de esgoto: Estudo de caso do estado do Paraná, Brasil. *Eng. Sanit. Ambient.*, v. 22, n. 6, p. 1129–1139, 2017.

BORRELY, S.I.; CRUZ, A.C.; DEL MASTRO, N.L.; SAMPA, M.H.O.; SOMESSARI E.S. Radiation Processing of Sewage and Sludge. A review. *Progress in Nuclear Energy*, v. 33, n. 1–2, p. 3–21, 1998.

BRAGA, B. B.; CARVALHO, T. R. A.; BROSINSKY, A.; FOERSTER, S.; MEDEIROS, P. H. A. From waste to resource: Cost-benefit analysis of reservoir sediment reuse for soil fertilization in a semiarid catchment. *Science of the Total Environment*, v. 670, p. 158–169, 2019.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução nº498, de 19 de agosto de 2020. Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de bio sólido em solos, e dá outras providências. CONAMA, 2020. Diário Oficial da União, Brasília, 21 ago. 2020. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-n-498-de-19-de-agosto-de-2020-273467970>> Acesso em: 4 de abril de 2021.

BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde - FUNASA. Manual de Saneamento. 3ed.rev. Brasília: FUNASA, 2007.

BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde - FUNASA. Manual de Saneamento. 5ed. Brasília: FUNASA, 2019.

BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde - FUNASA. Programa Nacional de Saneamento Rural (PNSR), 2019. Disponível em: <[http://www.funasa.gov.br/documents/20182/38564/MNL\\_PNSR\\_2019.pdf](http://www.funasa.gov.br/documents/20182/38564/MNL_PNSR_2019.pdf)>. Acesso em: 4 de abril de 2021.

BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde – FUNASA. Manual de Orientações Técnicas para Elaboração de Propostas para o Programa de Melhorias Sanitárias Domiciliares. Brasília:Funasa, 2014.

BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde – FUNASA. *CataloSan: Catálogo de soluções sustentáveis de saneamento - gestão de efluentes domésticos*. Campo Grande: UFMS, 2018.

- BRASIL. Ministério das Cidades. Plano Nacional de Saneamento Básico -Plansab, 2014.
- BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Plano Nacional de Saneamento Básico-Plansab, 2019. Disponível em:  
<[https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSDRU/ArquivosPDF/Versao\\_Conselhos\\_Resolu%C3%A7%C3%A3o\\_Alta\\_-\\_Capa\\_Atualizada.pdf](https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSDRU/ArquivosPDF/Versao_Conselhos_Resolu%C3%A7%C3%A3o_Alta_-_Capa_Atualizada.pdf)>. Acesso em: 1 março de 2021
- BRIX, H.; ARIAS, C.A. The use of vertical flow constructed wetlands for on-site treatment of domestic wastewater: new Danish guidelines. *Ecol. Eng.*, v. 25, p. 491–500, 2005.
- BRIX, H.; ARIAS, C.A. Use of willows in evapotranspirative systems for onsite wastewater management—theory and experiences from Denmark. *In: ORLOVIC, S (ed.). STREPOW: workshop proceedings*. Sérvia: Institute of Lowland Forestry and Environment, p. 159–166, 2011.
- CAMPOS, J.R.; POVINELLI, S. C. S.; AISSE, M. M.; SOUZA, M. A. A.; SAMWAYS, G.; SOBRINHO, P. A. Tratamento combinado de lodo de tanque séptico e de fossas com esgoto sanitário. *In: ANDREOLI, C.V. (coord.). Lodo de fossa e tanque séptico: caracterização, tecnologias de tratamento, gerenciamento e destino final*. Rio de Janeiro: ABES, 2009.
- CHRISTODOULOU, A.; STAMATELATOU, K. Overview of legislation on sewage sludge management in developed countries worldwide. *Water Science and Technology*, v. 73, n. 3, p. 453–462, 2016.
- COELHO, C. F. Impactos socioambientais e desempenho do sistema fossa verde no assentamento 25 de maio, Madalena (CE). 2013. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.
- COELHO, C.F.; REINHARDT, H.; DE ARAÚJO, J.C. Fossa verde como componente de saneamento rural para a região semiárida do Brasil. *Eng. Sanit. Ambient.*, v.23, n.4, p. 801-810, 2018.
- COLLIVIGNARELLI, M. C.; CANATO, M.; ABBÀ, A.; MIINO, M. C. Biosolids: What are the different types of reuse? *Journal of Cleaner Production*, v. 238, n.117844, 2019.
- COMPARINI, J.B. Estudo do decaimento de patógenos em biossólidos estocados em valas e em biossólidos submetidos à secagem em estufa. 2001. 278 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.
- COMPARINI, J.B.; ALÉM SOBRINHO, P. Decaimento de patógenos em biossólidos submetidos à secagem em estufa agrícola. *In: Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 28, 2002, Cancun. Anais [...]. Cancun: AIDIS, 2002. p.1-8.
- CURNEEN, S. J.; GILL, L. W. A comparison of the suitability of different willow varieties to treat on-site wastewater effluent in an Irish climate. *Journal of Environmental Management*, v. 133, p. 153–161, 2014.
- CURNEEN, S.; GILL, L. W. Willow-based evapotranspiration systems for on-site wastewater effluent in areas of low permeability subsoils. *Ecological Engineering*, v. 92, p. 199–209, 2016.

CYNAMON, S.E. Privada com fossa de fermentação. Revista do serviço especial de saúde pública, v. 13, n.2, p.7-17, dez 1967.

CYNAMON, S.E. Sistema não convencional de esgoto sanitário a custo reduzido, para cidades, vilas, povoados, áreas carentes e áreas periféricas. Rio de Janeiro: Fundação Osvaldo Cruz, 2003.

DE ARAÚJO, J. C.; BRITO, L.; SILVA, E. V. Água limpa e terra fértil: saneamento rural e gestão das águas no Sertão do Ceará. 1. ed. Fortaleza: Ed.UECE, 2016.

DE ARAÚJO, J. C.; BRONSTERT, A. A method to assess hydrological drought in semi-arid environments and its application to the Jaguaribe River basin, Brazil. Water International, v. 41, n. 2, p. 213–230, 2016.

DE ARAÚJO, J. C.; GONZALEZ PIEDRA, J. I. Comparative hydrology: analysis of a semiarid and a humid tropical watershed. Hydrological Processes, v. 23, p.1169-1178, 2009.

DIAS, E.H.O. Tratamento de lodo de esgoto por secagem em estufa: higienização e produção de biossólidos para uso agrícola. 2012. Dissertação (Mestrado em Saneamento e Ambiental) – Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

Disponível em:

<[https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/PlanSaB/plansab\\_texto\\_editado\\_para\\_download.pdf](https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/PlanSaB/plansab_texto_editado_para_download.pdf)> Acesso em: 8 de março de 2021

DODANE, P. H; BASSAN, M. Settling-Thickening Tanks. *In*: STRANDE, L.; RONTELTAP, M.; BRDJANOVIC, D. Faecal Sludge Management: Systems Approach for Implementation and Operation. Londres: IWA, 2014.

DOTRO, G.; LANGERGRABER, G.; MOLLE, P.; NIVALA, J.; PUIGAGUT, J.; STEIN, O.; VON SPERLING, M. Treatment Wetlands, Vol. 7. Londres: IWA, 2017.

DUBEY, M.; MOHAPATRA, S.; TYAGI, V.K.; SUTHAR, S.; KAZMI, A.A. Occurrence, fate, and persistence of emerging micropollutants in sewage sludge treatment. Environmental Pollution, v. 273, p. 1-18, 2021.

EUROSTAT. Sewage sludge production and disposal. Luxemburgo: European Statistical office, 2016.

EUROSTAT. Sewage sludge production and disposal. Luxemburgo: European Statistical office, 2019.

FEACHAM, R.G.; BRADLEY, D.J.; GARELICK, H.; MARA, D.D. Health Aspects of excreta and wastewater management. Chichester: John Wiley and Sons, 1983.

FIGUEIREDO, I. C. S.; MIYAZAKI, C. K.; MADRID, F. J. P. L.; DUARTE, N. C.; MAGALHÃES, T. M.; TONETTI, A. L. Fossa absorvente ou rudimentar aplicada ao saneamento rural: solução adequada ou alternativa precária? Revista DAE, v. 67, n. 220, p. 87–99, 2019.

FIGUEIREDO, I. C. S.; SANTOS, B. S. C.; TONETTI, A. L. Tratamento de esgoto na zona rural: fossa verde e círculo de bananeiras. Campinas: Biblioteca Unicamp, 2018.

- FRÉDETTE, C.; COMEAU, Y.; BRISSON, J. Design of a zero liquid discharge leachate treatment system using an evapotranspiration willow bed. *Water Research*, v. 209, p. 1-10, 2022.
- GALBIATI, A. F. Tratamento domiciliar de águas negras através de tanque de evapotranspiração. 2009. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) - Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2009.
- GOLD, M.; DAYER, P.; FAYE, C.; CLAIR, G.; SECK, A.; NIANG, S.; MORGENROTH, E.; STRANDE, L. Locally produced natural conditioners for dewatering of faecal sludge. *Environmental Technology*, p. 1-13, 2016.
- GONÇALVES, R. F.; LUDUVICE, M.; VON SPERLING, M. Remoção da umidade de lodos de esgotos. *In: ANDREOLI, C.V.; VON SPERLING, M; FERNANDES, F. Lodo de esgoto: tratamento e disposição final. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental-UFMG; Curitiba: Companhia de Saneamento do Paraná, 2001.*
- GREGERSEN, P.; BRIX, H. Zero-discharge of nutrients and water in a willow dominated constructed wetland. *Water Sci. Technol.*, v. 44, p. 407– 412, 2001.
- HARTMANN, C.M.; ANDREOLI, C. V.; EDWIGES, T.; LUPATINI, G.; ANDRADE NETO, C.O. Definições, histórico e estimativas de geração de lodo séptico no Brasil. *In: ANDREOLI, C. V. (coord.). Lodo de fossa e tanque séptico: caracterização, tecnologias de tratamento, gerenciamento e destino final. Rio de Janeiro: ABES, 2009.*
- HEINSS, U.; LARMIE, S.A.; STRAUSS, M. Characteristics of Faecal Sludges and their Solids-Liquid Separation. *Dubendorf: EAWAG/SANDEC, 1999.*
- HENDGES, L.; HENDGES, L.T.; REINHER, R.C.R.; LEICHTWEIS, J.; FERNANDES, E.J.; ÉDINA; TONES, A.R.M. Disposição final de lodo de estação de tratamento de água e de esgoto: uma revisão. *Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão*, v. 9, n. 2, 2020.
- HU, M.; FAN, B.; WANG, H.; QU, B.; ZHU, S. Constructing the ecological sanitation: A review on technology and methods. *Journal of Cleaner Production*, v. 125, p. 1–21, 2016.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008, Rio de Janeiro, 2008.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisa Nacional por amostra de domicílios 2013. Rio de Janeiro, 2013.
- INGUNZA, M.P.D.; CASSINI, S.T.; CORAUCCI FILHO, B.; ANARUMA FILHO, F.; TONETTI, A.L.; NASCIMENTO, R.F.; OLIVEIRA, J.P.; PINOTTI, L.M.; LIMA, J.F.; DIAS, F.P.; MARINHO, L.E.O. Aproveitamento de lodos de fossa e tanque sépticos. *In: CARVALHO E.H.; ANDREOLI C.V. (org.). Lodos de Fossa e Tanque Séptico: orientações para definição de alternativas de gestão e destinação. Curitiba: ABES, 2015.*
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Tabela de Dados das Estações. Brasília, DF, Brasil. Disponível em: <<https://tempo.inmet.gov.br/TabelaEstacoes#>> Acesso em: 4 de abril de 2021.