

BEATRIZ OLIVEIRA MOTA

**Alternativas sustentáveis para o tratamento de
efluentes domésticos em zonas rurais**

Beatriz Oliveira Mota

**Alternativas sustentáveis para o tratamento de
efluentes domésticos em zonas rurais**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Msc. Daniel Clemente Vieira Rêgo da Silva

Co-Orientador: Prof. Dr. João Ubiratan de Lima e Silva

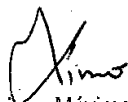
Guaratinguetá - SP
2017

M917a Mota, Beatriz Oliveira
Alternativas sustentáveis para o tratamento de efluentes domésticos
em zonas rurais / Beatriz Oliveira Mota – Guaratinguetá, 2017.
53 f. : il.
Bibliografia : f. 50-53

Trabalho de Graduação em Engenharia Civil – Universidade Estadual
Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017.
Orientador: Prof. Dr. Daniel Clemente Vieira Rego da Silva
Co-orientador: Prof. Dr. João Ubiratan de Lima e Silva

1. Saneamento rural. 2. Águas residuais – Purificação – Tratamento
biológico. 3. Desenvolvimento sustentável. I. Título

CDU 628



Luciana Máximo

Bibliotecária/CRB-8 3595

BEATRIZ OLIVEIRA MOTA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO
COMO

PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA CIVIL"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL


ENOS ARNEIRO NOGUEIRA DA SILVA
COORDENADOR DO CURSO DE ENGA CIVIL

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Msc. Daniel Clemente Vieira Rêgo da Silva
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. João Ubiratan de Lima Silva
UNESP-FEG


Prof. Msc. Rodrigo José Marassi
Membro Externo/EEL-USP

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a meus amados pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo fim desta jornada, de muito trabalho e aprendizado.

Aos meus pais, que são o motivo e o princípio de tudo, pelo apoio incondicional, por me ensinarem a seguir pelo bom caminho e fazerem sempre dos meus sonhos os seus sonhos. Obrigado por serem os guerreiros que são, pois me tornarem quem eu sou hoje. A cada dia pretendo evoluir para enchê-los cada vez mais de orgulho e emoção.

À minha irmã, pelo companheirismo e apoio em todos os momentos difíceis, por me incentivar a buscar meus sonhos. Agradeço também por ter enchido de alegria a nossa família com meus dois sobrinhos, Mariana e Bernardo.

À minha avó Terezinha, por todas as orações.

Ao meu professor e orientador Daniel, pela confiança e profissionalismo. Por todo conhecimento transmitido para realização deste trabalho. Ideias, exigências e rigor técnico que me fizeram ter cada vez mais vontade de estudar para alcançar o melhor resultado possível. Não conseguiria sem a ajuda dele.

Por fim, agradeço a todos os meus amigos e em especial às minhas amigas da República Intocáveis. Vocês são a minha família para sempre.

“isso de querer ser exatamente aquilo
que a gente é ainda vai nos levar além”

Paulo Leminski

RESUMO

O saneamento básico e mais especificamente o tratamento de efluentes são processos essenciais para preservação dos recursos naturais do planeta bem como a saúde da população. Nas zonas rurais o tratamento de efluentes é muitas vezes deixado de lado devido à falta de infra-estrutura para coleta e tratamento. Alternativas sustentáveis para o tratamento de efluentes envolvem tanto a esfera social, econômica, ambiental e são objeto de estudo deste trabalho dentro do contexto do Desenvolvimento Sustentável. Através de revisão de literatura foram analisados cinco tipos de tratamento de efluentes aplicáveis em zonas rurais, através do atendimento das necessidades dos moradores, baixo custo e facilidade de instalação e operação. Os tratamentos analisados foram: *Wetlands* Construídos, Fossa Séptica Biodigestora, Filtros de Areia, Escoamento Superficial e Tanque de Evapotranspiração. Para a escolha da alternativa de tratamento mais sustentável as questões econômicas, ambientais e sociais se apresentaram sob a forma de dezessete indicadores analisados para cada alternativa estudada de forma que especialistas atribuíram pesos a cada um deles para a composição do chamado indicador composto de sustentabilidade global, obtido pelo uso do método de tomada de decisão AHP (Método de Análise Hierárquica). No âmbito econômico o TEvap foi o melhor sistema de tratamento. No entanto, ao analisar o indicador global tem-se que a Fossa Biodigestora é o tratamento que apresenta a melhor solução para as zonas rurais, enquanto que o uso de filtros de areia é o menos indicado.

PALAVRAS-CHAVE: Saneamento. Rural. Tratamento de efluentes. Sustentabilidade.

ABSTRACT

Basic sanitation and more specifically the treatment of wastewater are essential processes for the preservation of the natural resources of the planet as well as the health of the population. In rural areas the treatment of effluents is often left out because of the lack of infrastructure for collection and treatment. Sustainable alternatives for the treatment of effluents involve the social, economic, environmental and are the subject of study of this work. Through a literature review, five types of effluent treatment applicable in rural areas were analyzed, meeting the needs of the residents, low cost and ease of installation and operation, in context of Sustainable Development. The treatments analyzed were: Constructed Wetlands, Septic Biodigestor, Sand Filters, Surface Drainage and Evapotranspiration Tank. In order to choose the most sustainable treatment alternative, economic, environmental and social issues were presented in the form of seventeen indicators analyzed for each alternative studied, so that experts attributed weights to each one of them for the composition of the so-called composite indicator of global sustainability, obtained through the use of the AHP (Hierarchical Analysis Process) decision-making method. In the economic sphere TEvap was the best treatment system. However, when analyzing the global indicator, it is observed that the Biodigestora Fossa is the treatment that presents the best solution for rural areas, while the use of sand filters is the least indicated.

KEYWORDS: Sanitation. Rural. Wastewater treatment. Sustainability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Cobertura global e regional por sistemas de esgotamento sanitário.	12
Figura 2: Dezesete metas para o Desenvolvimento Sustentável.	13
Figura 3: Fossa Negra no contexto ambiental.	16
Figura 4: Sólidos no esgoto.	18
Quadro 1: Características dos principais níveis de tratamento de esgoto.	20
Figura 5: Interação entre a tecnologia e o ambiente.	21
Figura 6: Número de artigos relevantes ao longo dos últimos 10 anos em periódicos científicos.	23
Figura 7: Estrutura hierárquica para a análise das cinco tecnologias de tratamento de esgoto AHP.	24
Figura 8: Sistema com macrófitas de fluxo subsuperficial vertical (A), sistema com macrófitas de fluxo subsuperficial horizontal (B) e sistema com macrófitas de fluxo superficial (C).	30
Figura 9: Esquema do <i>Wetland</i> Construído: (1) dispositivo de distribuição do afluente; (2) zona de entrada; (3) geomembrana impermeável; (4) zona de saída; (5) caixa de coleta; (6) dispositivo de descarga e controle do nível; (7) rede de esgotamento do efluente; (8) meio suporte; (9) pontos internos de coleta de amostra do líquido residente.	31
Figura 10: Representação esquemática do corte do <i>Wetland</i> Construído.	32
Figura 11: Contribuição média para a remoção de poluentes por tanque de sedimentação e <i>Wetland</i> ((a) demanda bioquímica de oxigênio (BOD), (b) sólidos suspensos totais (TSS), (c) nitrogênio (N), e (d) fósforo (P)).	33
Figura 12: Representação dos componentes da Fossa Séptica Biodigestora.	35
Figura 13: Esquema de um filtro anaeróbio com recheio de bambu (A) e sua vista externa (B) e interna (C).	37
Figura 15: Sistema de escoamento superficial em vista (A) e esquemático (B).	40
Figura 16: Corte transversal de TEvap.	43
Figura 17: Indicador composto de sustentabilidade global para os sistemas de tratamento de esgoto avaliados.	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Indicadores que foram identificados para a escolha da tecnologia mais sustentável para o tratamento de águas residuais em zonas rurais.	22
Tabela 2: Indicadores para avaliar a sustentabilidade do tratamento de esgoto.	25
Tabela 3: Pesos das dimensões e indicadores de sustentabilidade expressos em porcentagem.	27
Tabela 4: Total de alternativas para tratamento de esgoto em cada revista científica analisada.	28
Tabela 5: Faixa de valores extremos da relação área per capita em <i>Wetlands</i> Construídos de fluxo horizontal reportados na literatura brasileira.	30
Tabela 6: Eficiência na remoção de poluentes pelo <i>Wetland</i>	32
Tabela 7: Levantamento qualitativo e quantitativo dos materiais do <i>Wetland</i> Construído	33
Tabela 8: Eficiência na remoção de poluentes pela Fossa Séptica Biodigestora.	35
Tabela 9: Levantamento qualitativo e quantitativo dos materiais da Fossa Biodigestora.	36
Tabela 10: Eficiência na remoção de poluentes pelo Filtro de Areia.	39
Tabela 11: Levantamento qualitativo e quantitativo dos materiais do Filtro Anaeróbio associado a Filtros de Areia.	39
Tabela 12: Eficiência na remoção de poluentes pela Rampa de Escoamento Superficial	41
Tabela 13: Levantamento qualitativo e quantitativo dos materiais do Filtro Anaeróbio associado a rampa de Escoamento Superficial	41
Tabela 14: Eficiência na remoção de poluentes pelo TEvap.	43
Tabela 15: Levantamento qualitativo e quantitativo dos materiais do TEvap.	44
Tabela 16: Indicadores de sustentabilidade inicial para cada sistema de tratamento de esgoto avaliado neste estudo	45
Tabela 17: Indicadores compostos das dimensões avaliadas para os sistemas de tratamento de esgoto.	48

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	JUSTIFICATIVA	14
3	OBJETIVOS	15
3.1	OBJETIVO GERAL	15
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
4	REVISÃO DE LITERATURA.....	16
4.1	SANEAMENTO BÁSICO EM ZONAS RURAIS	16
4.2	ESGOTOS SANITÁRIOS.....	17
4.3	NÍVEIS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES.....	19
4.4	ESCOLHA DO SISTEMA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES ATRAVÉS DE INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE.....	20
5	METODOLOGIA.....	23
5.1	ANÁLISE DE SUSTENTABILIDADE DOS SISTEMAS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES	19
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	28
6.1	CARACTERIZAÇÃO DAS ALTERNATIVAS EXISTENTES PARA TRATAMENTO LOCAL DE EFLUENTES.....	29
6.1.1	<i>Wetlands</i> construídos	29
6.1.2	Fossas sépticas	34
6.1.3	Filtro anaeróbio associado a filtro de areia	37
6.1.4	Filtro anaeróbio associado a escoamento superficial	40
6.1.5	Tanque de evapotranspiração	42
6.1.6	Avaliação da sustentabilidade dos sistemas de tratamento de esgoto.....	45
6.1.6.1	<i>Considerações acerca dos indicadores</i>	46
6.1.6.2	<i>Análise dos resultados</i>	47
7	CONCLUSÕES.....	49
	REFERÊNCIAS.....	50

1. INTRODUÇÃO

O agravamento de problemas ambientais, como a escassez de recursos naturais, aquecimento global e crise energética são uma temática em destaque nos tempos atuais e culmina com a preocupação em relação ao futuro do planeta. As tecnologias sustentáveis são desenvolvidas para promover o melhor aproveitamento dos recursos naturais e gerar um menor impacto sobre o meio ambiente. Algumas alternativas podem ser citadas como o uso de materiais de construção locais e de baixo impacto ambiental, tratamento de esgotos e captação de água da chuva para reuso, energia solar, eólica entre outras (SCHERER, 2009).

A falta de saneamento básico é um problema mundial que afeta os corpos hídricos receptores e a saúde das pessoas. Cientificamente é reconhecida a associação entre condições inadequadas de saneamento tais como a falta de abastecimento de água potável, esgotamento sanitário, mecanismos de limpeza urbana, manejo de resíduos e o quadro de saúde pública de um local. Vários autores associam o abastecimento de água e o esgotamento sanitário com a saúde, explicando a influência, por exemplo, sobre a diarreia ou mortalidade infantil. (HELLER, 1998; TEIXEIRA; HELENA; GOMES, 2012).

Um estudo divulgado pela World Health Organization (WHO) (2017) mostra que 892 milhões de pessoas em todo o mundo ainda têm seus dejetos lançados a céu aberto e 2,3 bilhões de pessoas ainda não possuem acesso um serviço básico de saneamento. A Figura 1 apresenta a cobertura regional e global por sistemas de esgotamento sanitário. Nota-se que países em desenvolvimento mantêm altos índices de defecação a céu aberto e pouca cobertura por manejo seguro.

O aspecto social, econômico e ambiental são as três dimensões envolvidas na busca pelo desenvolvimento sustentável de modo que todas elas estão interligadas e devem ser estimuladas integralmente. A água e o saneamento integram a 6ª meta dos dezessete objetivos da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, conforme a Figura 2. São alguns objetivos que devem ser atingidos até 2030 (UN-WATER, 2016):

- Garantir a disponibilidade universal do saneamento;
- Acesso equitativo a água potável;
- Fim da defecação a céu aberto;
- Melhorar a qualidade da água e diminuir a poluição;
- Reduzir a proporção de águas residuais não tratadas e promover a reutilização segura em todo o mundo;

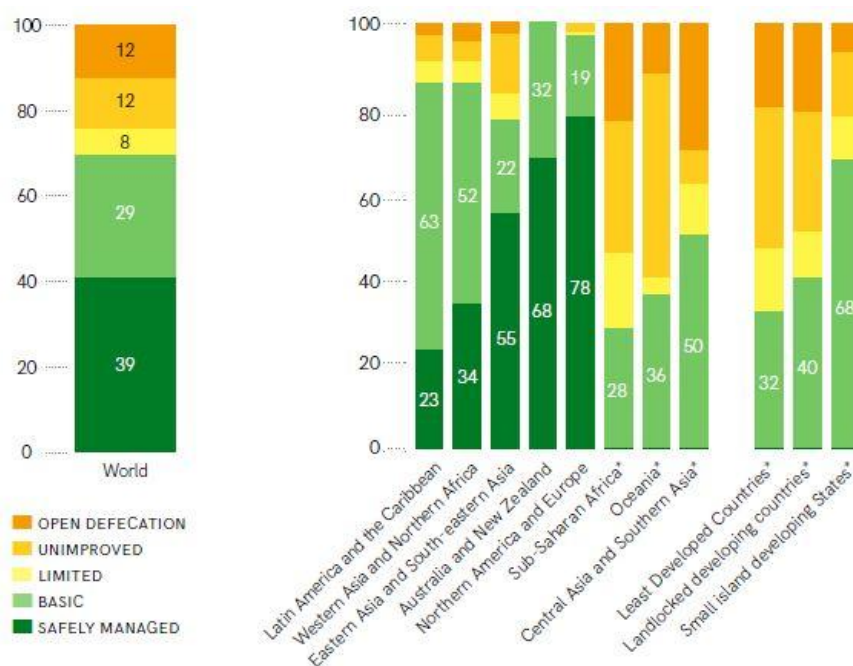
- Implementar a gestão integrada dos recursos hídricos.

O problema da disposição inadequada de esgoto doméstico na zona rural é ainda mais complicado, pois estas localidades na maioria dos casos não possuem infraestrutura para o tratamento dos efluentes gerados (PERES et al., 2010).

Com a instituição da Lei nº 11445 (BRASIL, 2007) ficou estabelecido que deveria ocorrer o aumento progressivo dos domicílios aos serviços de saneamento básico, tais como disponibilidade de água de boa qualidade, coleta e tratamento de esgotos e resíduos e ainda “proporcionar condições adequadas de salubridade ambiental às populações rurais e de pequenos núcleos urbanos isolados”.

O tratamento de efluentes pode ser feito com diferentes técnicas, sendo as mais conhecidas aquelas que demandam energia elétrica ou produtos químicos. Sendo assim é necessária a busca por alternativas ao tratamento de efluentes de fácil construção e manutenção, que tomam como base os conceitos da sustentabilidade de modo a transformar o cenário atual de carência de saneamento nas áreas rurais e tratamento de esgoto centralizador nas zonas urbanas (MARTINETTI; SHIMBO; TEIXEIRA, 2007).

Figura 1: Cobertura global e regional por sistemas de esgotamento sanitário.



Fonte: WHO (2017).

Figura 2: Dezesete metas para o Desenvolvimento Sustentável.



Fonte: ONU Brasil (2017).

2 JUSTIFICATIVA

A importância deste trabalho se dá sob o ponto de vista da universalização dos serviços de saneamento básico em áreas desprovidas de um sistema de esgotamento sanitário com a análise de alternativas viáveis sob o ponto de vista ambiental, econômico e social.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Analisar as alternativas para tratamento de efluentes em zonas rurais através de revisão da literatura.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar teoricamente cada sistema de tratamento de efluentes revisado em literatura e aplicável em zonas rurais.
- Identificar os sistemas de tratamento de efluentes aplicáveis em zonas rurais através do atendimento das necessidades dos moradores, baixo custo e facilidade de instalação e operação. Além disso, o sistema deve seguir parâmetros técnicos construtivos e ser eficiente na remoção de poluentes presentes no efluente.
- Avaliar a sustentabilidade dos sistemas de tratamento de esgoto encontrados em literatura através do uso de um indicador que engloba as esferas econômicas, ambientais e sociais.

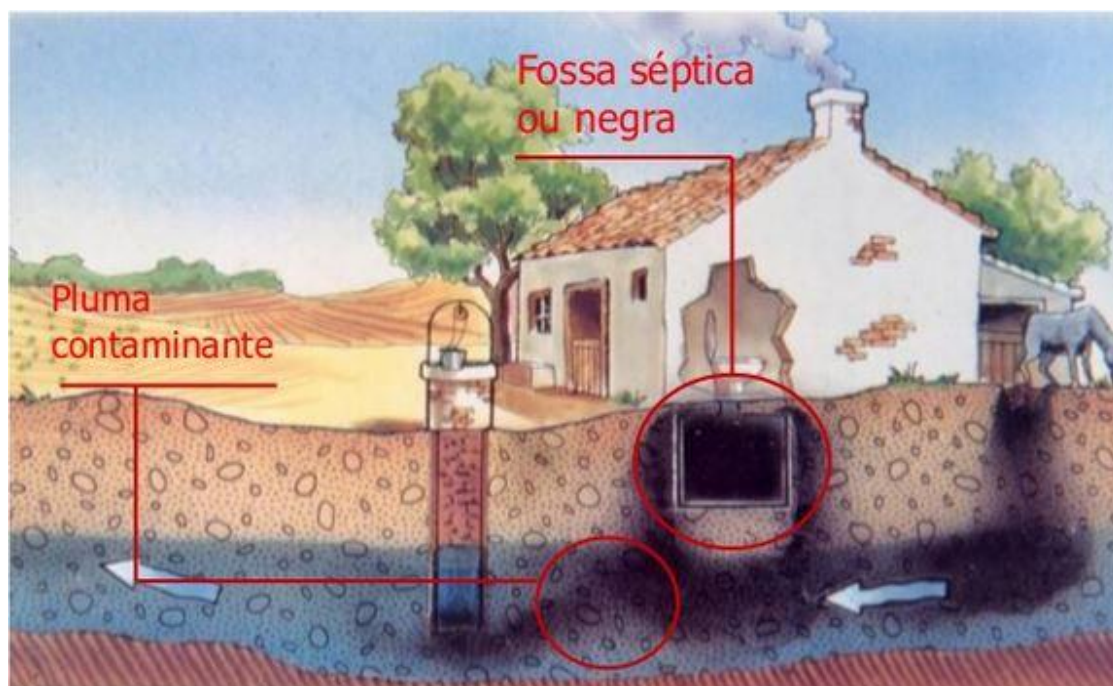
4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 SANEAMENTO BÁSICO EM ZONAS RURAIS

A Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios – PNAD (IBGE, 2015) apontou que aproximadamente 10% dos domicílios localizados na zona rural não tem esgotamento sanitário e quase metade deles (44%) utilizam formas rudimentares de descarte do efluente, tais como fossa negras.

Nas zonas rurais as fossas negras são as principais responsáveis pela contaminação das águas subterrâneas. Muitas vezes faz-se o uso da água contaminada através de poços construídos na propriedade, sem qualquer análise de poluentes. A Figura 3 mostra o contexto ambiental de uma fossa negra, construída com uma simples escavação do solo sem nenhum cuidado com o revestimento interno. Com a deposição de excretas dentro dessa fossa rudimentar acontece a decomposição da matéria orgânica e produção de chorume, líquido com altas concentrações de poluentes. Este líquido infiltra nas paredes da fossa e pode atingir as águas subterrâneas (SILVA; FAUSTINO; NOVAES, 2007).

Figura 3: Fossa Negra no contexto ambiental.



Fonte: Varnier (2013).

Segundo Lima (2012) há pouco investimento do Estado em ações que minimizem a poluição gerada por dejetos nas áreas rurais, pois há a falsa crença que o esgoto doméstico tem baixa carga poluidora. No entanto deve-se considerar que as áreas rurais se encontram em locais de importância ambiental, sobretudo por se caracterizar em local onde se encontram importantes nascentes e numerosa produção agrícola. O despejo inadequado de dejetos nos corpos hídricos causa mudanças físicas químicas e biológicas e dessa forma contribuem para a degradação do ecossistema.

Comunidades rurais têm aplicado várias tecnologias para solucionar o problema da falta de saneamento básico e muitas vezes essas tecnologias são vistas como inferiores em relação às soluções técnicas adotadas para os centros urbanos. No entanto, a literatura mostra que uma série de alternativas aplicadas em comunidades permite a geração de trabalho e renda associados com a preservação dos recursos naturais (COSTA, 2013).

As alternativas para esgotamento sanitário em zonas rurais devem incorporar a participação da comunidade, o respeito à cultura e conhecimentos locais e promover a educação ambiental. O custo, eficiência de remoção dos poluentes e sustentabilidade devem também estar associados a tecnologias que melhorem as condições de saúde e higiene da comunidade (COSTA, 2013; SCHERTENLEIB; PANESAR, 2007).

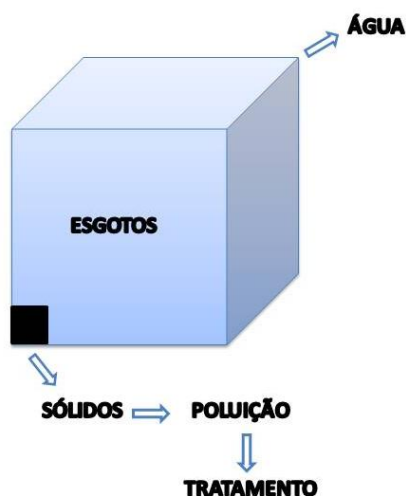
4.2 ESGOTOS SANITÁRIOS

Segundo Otterpohl (2001) o esgoto sanitário pode ser classificado em 4 cores, com base em suas origens, conforme a classificação a seguir:

- Água Negra: Oriunda dos vasos sanitários;
- Água Cinza: Águas residuais excluindo o efluente do vaso sanitário;
- Água Amarela: Composta somente por urina;
- Água Marrom: Composta somente por fezes.

Os esgotos domésticos são compostos por aproximadamente 99,9% de água. A parcela de 0,01% que corresponde aos sólidos justifica a necessidade de tratamento dos efluentes, conforme representado na Figura 4. A característica do esgoto está ligada intrinsecamente ao uso que foi dado à água, e varia de acordo com a classe social, clima e hábitos da população (VON SPERLING; LEMOS CHERNICHARO, 2005).

Figura 4: Sólidos no esgoto.



Fonte: Von Sperling e Lemos Chernicharo (2005).

Os principais parâmetros dos esgotos domésticos que devem ser considerados são: sólidos, indicadores de matéria orgânica, Nitrogênio (N), Fósforo (P) e indicadores de contaminação fecal (VON SPERLING; LEMOS CHERNICHARO, 2005). As características geralmente são analisadas através da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO) e sólidos suspensos totais (SST). O nitrogênio e o fósforo são nutrientes importantes para o processo biológico de tratamento de esgotos e podem causar eutrofização dos corpos receptores se não tratados. Os dejetos humanos podem liberar ainda organismos vivos patogênicos causadores de doenças ou decompositores de matéria orgânica que auxiliam no processo de tratamento do esgoto (UEHARA et al., 1989).

A determinação de DBO e DQO é importante para caracterizar a quantidade de carga poluidora do esgoto, pois são indicadores de processos oxidáveis, ou seja, o consumo de oxigênio dissolvido pelos micro-organismos em seus processos metabólicos para estabilização da matéria orgânica são indicadores de poluição. Tanto a DBO quanto a DQO são uma medida indireta do nível de matéria orgânica presente no efluente, a diferença entre elas é claramente encontrada na nomenclatura. A DBO se refere a um processo bioquímico de oxidação da matéria orgânica enquanto que a DQO é um processo químico (VON SPERLING; LEMOS CHERNICHARO, 2005).

Segundo Von Sperling e Lemos Chernicharo (2005) o nitrogênio é um componente importante na poluição das águas, pois é indispensável para o crescimento de algas e sendo assim pode causar a eutrofização dos corpos receptores do efluente. A conversão do amônio

em nitrito e deste em nitrato implica no consumo de oxigênio. Ainda pode-se dizer que o nitrogênio na forma de amônia livre é tóxico aos peixes.

Em um curso d'água a determinação da forma predominante do nitrogênio pode indicar o estágio da poluição. Se a poluição é recente, o nitrogênio estará sob a forma de nitrogênio orgânico ou amônia, e se a poluição é mais antiga estará sob a forma de nitrato. Para esgotos domésticos brutos as formas predominantes são o nitrogênio orgânico e a amônia que juntos formam o chamado Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK) (VON SPERLING; LEMOS CHERNICHARO, 2005).

Os dois últimos parâmetros ressaltados por Von Sperling e Lemos Chernicharo (2005) são o fósforo e os indicadores de contaminação fecal. O fósforo é um importante nutriente responsável pelo crescimento de micro-organismos estabilizadores da matéria orgânica e, assim como o nitrogênio, pode causar o crescimento de algas e consequentemente a eutrofização dos corpos d'água. Os indicadores por sua vez de contaminação fecal são bactérias do grupo coliforme que assinalam a contaminação por fezes humanas ou animais.

4.3 NÍVEIS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES

A remoção dos poluentes deve atender às exigências de qualidade definidas para cada etapa de tratamento e da eficiência de remoção dos poluentes, o Quadro 1 apresenta as características de cada nível de tratamento de acordo com a eficiência de remoção dos poluentes, mecanismos de tratamento predominante e cumprimento da legislação para lançamento do efluente no meio. O tratamento preliminar e primário visa à remoção de poluentes através de mecanismos físicos. Neste nível de tratamento deve ocorrer a remoção de sólidos sedimentáveis e de parte da matéria orgânica. O tratamento secundário, por sua vez visa a remoção de poluentes mais específicos tais como nitrogênio e fósforo (VON SPERLING; LEMOS CHERNICHARO, 2005). Um sistema individual de tratamento de esgoto sanitário deve possuir todos os níveis de tratamento necessários, para remoção máxima dos poluentes (WEBER; KAICK, 2014).

Quadro 1: Características dos principais níveis de tratamento de esgoto.

Item	Tratamento Preliminar	Tratamento Primário	Tratamento Secundário
Poluentes Removidos	Sólidos Grosseiros	Sólidos Sedimentáveis DBO em suspensão	Sólidos não sedimentáveis DBO em suspensão fina DBO solúvel Nutrientes (parcialmente) Patogênicos (parcialmente)
Eficiência de remoção	-	SS: 60-70% DBO: 30-40% Coliformes: 30-40%	DBO: 60-99% Coliformes: 60-99% Nutrientes: 10-50%
Mecanismo de tratamento predominante	Físico	Físico	Biológico
Cumpre o padrão de lançamento?	Não	Não	Usualmente sim

Fonte: Von Sperling (2005).

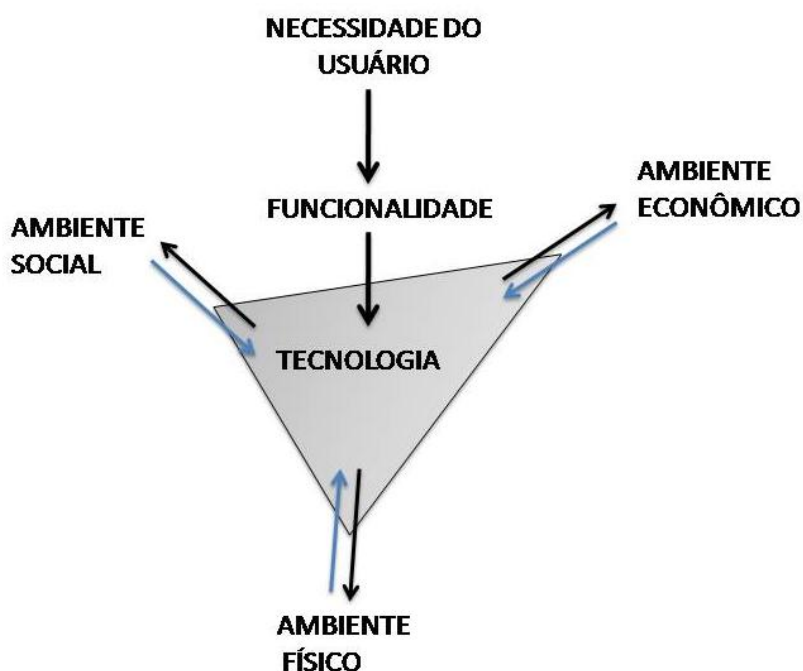
4.4 ESCOLHA DO SISTEMA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES ATRAVÉS DE INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE

A sustentabilidade é um conceito bastante abrangente e complexo. A definição do termo não está ligada somente ao fator ambiental, mas também a fatores econômicos, sociais e políticos. As alternativas mais sustentáveis de saneamento envolvem sistemas baseados na redução da poluição, economia de energia e água, diminuição de consumo de matérias-primas, melhoria das condições de segurança e saúde dos trabalhadores e usuários. Além disso, deve-se focar em processos naturais de tratamento de esgoto que possibilitam o retorno ao

ambiente através de reuso do efluente tratado para adubação, irrigação ou outro reuso não potável (MARTINETTI; SHIMBO; TEIXEIRA, 2007).

A eficiência de um sistema de tratamento de esgoto deve atender a critérios funcionais através da avaliação de indicadores de sustentabilidade. Para definir a lista de indicadores de sustentabilidade utilizou-se a representação entre a interação da tecnologia (simbolizada nesse caso pelo sistema de tratamento de águas residuais) com o ambiente, ilustrada pela Figura 5. A Figura 5 mostra que a necessidade do usuário deve ser traduzida por critérios funcionais a serem atendidos pela tecnologia. Para funcionar, a tecnologia extrai recursos do meio ambiente tais como matérias-primas e o afeta com emissão de poluentes. Além disso, capital e mão de obra são retirados do ambiente econômico e são devolvidos a ele em forma de lucro. O ambiente social é influenciado, por exemplo, pela aceitação do uso da tecnologia e mudança do comportamento que ela pode provocar na comunidade caso seja implantada (BALKEMA et al., 2001).

Figura 5: Interação entre a tecnologia e o ambiente.



Fonte: Adaptado pela autora de Balkema et al. (2001).

Sendo assim, foram definidos para o trabalho três dimensões de sustentabilidade e dezessete indicadores (MOLINOS-SENANTE et al., 2014) conforme se pode observar na Tabela 1.

Tabela 1: Indicadores que foram identificados para a escolha da tecnologia mais sustentável para o tratamento de águas residuais em zonas rurais.

Dimensão	Indicador	Descrição
Econômica	Custo do Investimento	Recursos para construção (R\$).
	Custo de manutenção	Recursos financeiros despendidos para manutenção (R\$).
Ambiental	Eficiência na remoção de Matéria Orgânica	Porcentagem de Matéria Orgânica retirada do afluente (%).
	Eficiência na remoção de Sólidos Suspensos	Porcentagem de Sólidos Suspensos retirados do afluente (%).
	Eficiência na remoção de Nitrogênio	Porcentagem de Nitrogênio retirado do afluente (%).
	Eficiência na remoção de Fósforo	Porcentagem de Fósforo retirado do afluente (%).
	Consumo de Energia	Consumo de eletricidade para operação (KWh).
	Área requerida	Área necessária para construção (m²).
	Produção de lodo	Volume de lodo fresco ou digerido armazenado (Kg)
	Potencial de reuso da água	Produção de efluente líquido dentro dos parâmetros da NBR 13969 (1997).
	Potencial de recuperação de produtos	Produção de adubo ou biofertilizante.
	Confiabilidade	Baixa frequência em aparecimento de problemas.
Social	Odor	Produção de odores.
	Barulho	Produção de ruídos no local.
	Impacto visual	Perturbação visual causada pela implantação no local.
	Aceitação das pessoas	Impacto positivo aos usuários.
	Complexidade	Dificuldade do usuário na operação do sistema ou intervenção em caso de necessidade.

Fonte: Adaptado de Molinos (2014).

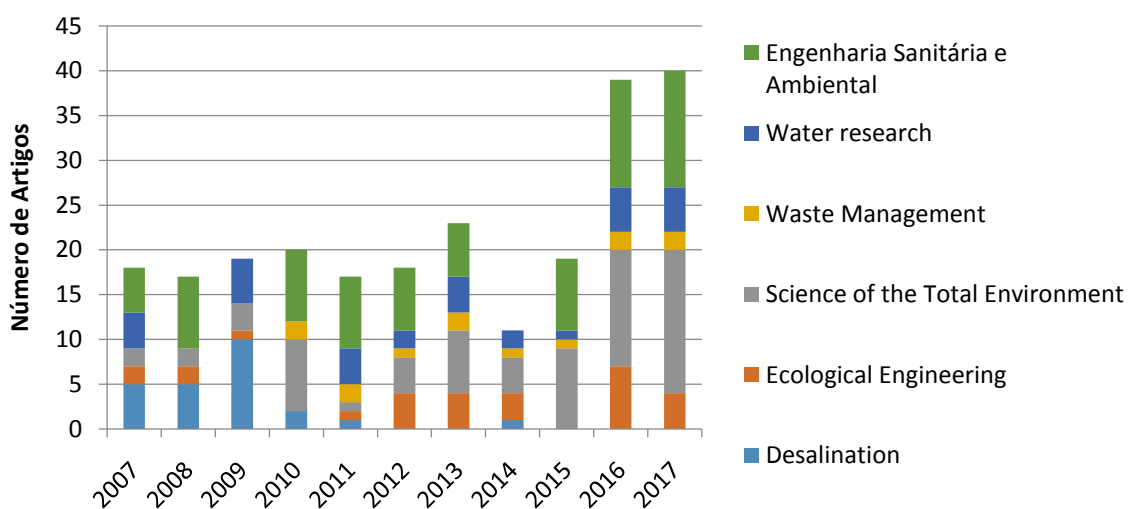
5 METODOLOGIA

A modalidade de pesquisa adotada neste trabalho é conhecida como Pesquisa Bibliográfica, e é realizada a partir do registro disponível em pesquisas anteriores, com levantamento de dados ou teorias já trabalhados por outros pesquisadores (SEVERINO, 1985).

Para a realização desta pesquisa um total de 232 publicações foram encontradas através do acesso ao Portal de periódicos CAPES/MEC com a utilização das palavras-chave em inglês “rural”, “sanitation”, “wastewater” e “treatment” para seguintes revistas científicas: *Water Research*, *Waste Management*, *Science of the Total Environment*, *Ecological Engineering* e *Desalination*. As mesmas palavras-chave foram utilizadas para analisar as publicações da Revista brasileira “Engenharia Sanitária e Ambiental” com um total de 111 publicações.

Sendo assim, um total de 343 publicações foram analisadas para composição do estudo. A Figura 6 apresenta a frequência de publicações nos últimos 10 anos de cada revista científica analisada, totalizando o número de 263 publicações para este período.

Figura 6: Número de artigos relevantes ao longo dos últimos 10 anos em periódicos científicos.



Fonte: Autoria Própria.

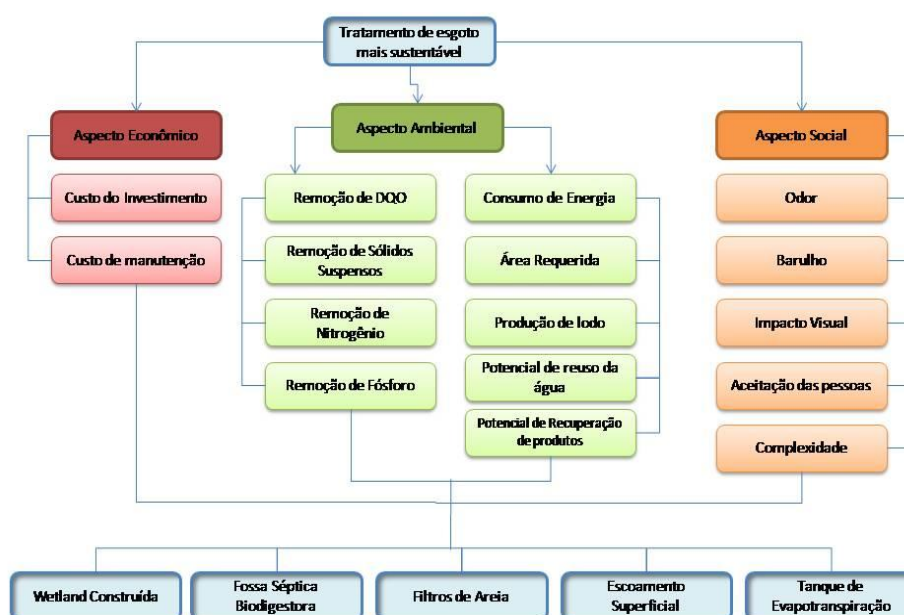
5.1 ANÁLISE DE SUSTENTABILIDADE DOS SISTEMAS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES.

Considerou-se as seguintes alternativas apresentados para tratamento de esgoto domiciliar: Fossa Séptica Biodigestora , Tanque de Evapotranspiração, *Wetlands* Construídos, Filtros Anaeróbios associados à Filtro de Areia e ao Escoamento Superficial.

O indicador composto descrito por Molinos-Senante et al. (2014), baseado no Método de Análise Hierárquica (AHP) foi aplicado a estes estudos de caso para analisar a sustentabilidade dos diferentes tipos de tratamento de águas residuais considerados. Desse modo foi possível determinar a alternativa mais indicada para diversos indicadores relacionados às dimensões econômicas, sociais e ambientais.

O AHP é um método de tomada de decisão para um problema afetado por múltiplos fatores. Para sua aplicação o problema deve ser subdividido em vários sub-problemas organizados de acordo com a hierarquia em níveis. O nível superior denota o objetivo do problema e os níveis intermediários indicam os fatores que afetam o nível superior. O nível inferior contem as alternativas consideradas para atingir o objetivo estabelecido no nível superior (BOTTERO; COMINO; RIGGIO, 2011). A Figura 7 mostra a estrutura hierárquica que será estudada neste trabalho para a tomada de decisão do modelo de tratamento mais sustentável.

Figura 7: Estrutura hierárquica para a análise das cinco tecnologias de tratamento de esgoto AHP.



Fonte: Autoria Própria.

A Tabela 2 apresenta os dezessete indicadores definidos por Molinos-Senante et al. (2014) correspondente a cada dimensão considerada. Além disso, mostra se o indicador tem impacto positivo (aumento diretamente proporcional à sustentabilidade) ou negativo (aumento inversamente proporcional à sustentabilidade), fórmula para obtenção de indicadores quantitativos e designação de indicadores qualitativos. Na última coluna são apresentadas as unidades de cada indicador.

Tabela 2: Indicadores para avaliar a sustentabilidade do tratamento de esgoto.

Dimensão	Item	Indicador	Direção	Fórmula	Unidade
Econômica	1	Custo do Investimento	Negativa	$CustoTotal$	R\$
	2	Custo de manutenção	Negativa	$Custo\ Total$	R\$
Ambiental	3	Eficiência na remoção de Matéria Orgânica	Positiva	$\frac{DQO(af) - DQO(ef)}{DQO(af)}$	-
	4	Eficiência na remoção de Sólidos Suspensos	Positiva	$\frac{SS(af) - SS(ef)}{SS(af)}$	-
	5	Eficiência na remoção de Nitrogênio	Positiva	$\frac{N(af) - N(ef)}{N(af)}$	-
	6	Eficiência na remoção de Fósforo	Positiva	$\frac{F(af) - F(ef)}{F(af)}$	-
	7	Consumo de Energia	Negativa	KWh	KWh
	8	Área requerida	Negativa	Área	m²
	9	Produção de lodo	Negativa	KG lodo	KG
	10	Potencial de reuso da água	Positiva	Qualitativo	-
	11	Potencial de recuperação de produtos	Positiva	Qualitativo	-
	12	Confiabilidade	Positiva	Qualitativo	-
Social	13	Odor	Negativa	Qualitativo	-
	14	Barulho	Negativa	Qualitativo	-
	15	Impacto visual	Negativa	Qualitativo	-
	16	Aceitação das pessoas	Positiva	Qualitativo	-
	17	Complexidade	Negativa	Qualitativo	-

Fonte: Adaptado de Molinos-Senante et al. (2014).

Os indicadores qualitativos podem ser associados a uma escala numérica com o seu correspondente impacto. Sendo assim, os números 1, 3, 5, 7 e 9 correspondem respectivamente a um impacto “Muito Baixo”, “Baixo”, “Moderado”, “Alto” e “Muito Alto”.

Os indicadores são normalizados para assumirem um valor adimensional variando entre 0 e 1 para possibilitar a associação entre eles. As Equações (1) e (2) correspondem à normalização feita para indicadores positivos e negativos respectivamente.

$$IN_{ij} = \frac{I_{ij} - I_j^{mín}}{I_j^{máx} - I_j^{mín}}, \text{ para indicador positivo.} \quad (1)$$

$$IN_{ik} = \frac{I_k^{máx} - I_{ik}}{I_k^{máx} - I_k^{mín}}, \text{ para indicador negativo.} \quad (2)$$

I_{ij} denota o valor da i -ésima tecnologia no j -ésimo indicador positivo, IN_{ij} o valor normalizado. I_{jk} por sua vez fornece o valor da i -ésima tecnologia no indicador negativo k -ésimo, IN_{ik} é o seu respectivo valor normalizado. $I_j^{mín}$ e $I_j^{máx}$ são os valores mínimos e máximos respectivamente do indicador j . $I_k^{mín}$ e $I_k^{máx}$ são os valores mínimos e máximos respectivamente do indicador k .

Após a normalização dos indicadores, o próximo passo é agregá-los. Para isso, define-se pesos representando a importância relativa de cada indicador. Os pesos das dimensões e indicadores de sustentabilidade foram obtidos através de pesquisa com 45 especialistas em tratamento de águas residuais internacionais e são apresentados na Tabela 3 (MOLINOS-SENANTE et al., 2014).

Com os pesos de cada indicador definido deve-se multiplicar o valor de cada indicador normalizado por seu respectivo peso, de acordo com as equações (3), (4) e (5) respectivamente para as dimensões econômicas (EC), ambientais (AM) e sociais (SC).

$$EC_i = \sum_{e=1}^E P_e \cdot IN_{ie} \quad (3)$$

$$AM_i = \sum_{a=1}^A P_a \cdot IN_{ia} \quad (4)$$

$$SC_i = \sum_{s=1}^S P_s \cdot IN_{is} \quad (5)$$

Os índices $i=1,2,\dots$ correspondem à tecnologia de tratamento de esgoto; $e=1,2,\dots,E$ onde (e) é o número do indicador econômico; $a=1,2,\dots,A$ onde (a) é o número do indicador ambiental; $s=1,2,\dots,S$ onde (s) é o número do indicador social; P_e corresponde ao peso do indicador econômico; P_a corresponde ao peso do indicador ambiental; P_s corresponde ao peso

do indicador social; IN_{ie} é o valor normalizado do indicador econômico; IN_{ia} é o valor normalizado do indicador ambiental; ; IN_{is} é o valor normalizado do indicador social.

Considerando o peso relativo de cada dimensão de sustentabilidade, pode-se obter a sustentabilidade geral de cada tecnologia para tratamento de esgotos segundo a equação (6):

$$SG_i = P_{ec}.EC_i + P_{am}.AM_i + P_{sc}.SC_i \quad (6)$$

SG_i é o indicador global de sustentabilidade da i-ésima tecnologia de tratamento de esgoto avaliada. P_{ec} , P_{am} e P_{sc} representam os pesos das dimensões econômicas, ambientais e sociais respectivamente. EC_i é a sustentabilidade econômica do tratamento i; AM_i é a sustentabilidade ambiental do tratamento i; SC_i é a sustentabilidade social do tratamento de esgoto i.

Tabela 3: Pesos das dimensões e indicadores de sustentabilidade expressos em porcentagem.

Dimensão	Indicador	Peso dos indicadores (%)	Peso das dimensões (%)
Econômica	Custo do Investimento	33,6	30,8
	Custo de manutenção	66,4	
Ambiental	Eficiência na remoção de Matéria Orgânica	14,6	47,1
	Eficiência na remoção de Sólidos Suspensos	12,4	
	Eficiência na remoção de Nitrogênio	10,7	
	Eficiência na remoção de Fósforo	12,4	
	Consumo de Energia	8,8	
	Área requerida	7,8	
	Produção de lodo	9,7	
	Potencial de reuso da água	9,4	
	Potencial de recuperação de produtos	6,5	
	Confiabilidade	7,8	
Social	Odor	37,2	22,1
	Barulho	18,2	
	Impacto visual	9,2	
	Aceitação das pessoas	23	
	Complexidade	12,4	

Fonte: Molinos-Senante (2014).

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a realização da revisão bibliográfica, nas 343 publicações encontradas inicialmente foram pesquisados nos títulos, resumos e palavras-chave alternativas para o tratamento de águas residuais. Um total de 50 artigos foram encontrados como base para levantamento das alternativas de tratamento de esgoto mais usuais e possíveis de serem aplicadas em zonas rurais, compreendendo cerca de 14% do total de publicações. A tabela 4 apresenta as alternativas encontradas para cada periódico utilizado como fonte de pesquisa do estudo.

Tabela 4: Total de alternativas para tratamento de esgoto em cada revista científica analisada.

Alternativas para o tratamento de esgotos	TP*	DS	EE	STE	WM	WR	ESA
<i>Wetland</i> Construído	26	5	12	1	-	4	4
Fossa Séptica	9	-	-	2	-	4	3
Filtro Anaeróbio + Filtro de Areia	7	-	1	-	-	1	5
Tanque de Evapotranspiração	1	-	1	-	-	-	-
Filtro Anaeróbio + Escoamento Superficial	1	-	-	-	-	-	1
Outros*	6	2	1	1	1	1	-

TP: Total de Publicações; DS.: *Desalination*; EE: *Ecological Engineering*; STE: *Science of the Total Environment*; WM: *Waste Management*.; ESA: Engenharia Sanitária e Ambiental.

*correspondem a tratamento de esgoto do tipo banheiro seco e *urine-diverting dry toilet* (UDDT)

Fonte: Autoria Própria.

Os sistemas denominados *Wetlands* predominaram nos resultados obtidos na pesquisa, aparecendo em 52% das publicações. Em algumas situações, *Wetlands* são utilizados como tratamento final dos efluentes como se verifica em Brasil (2005), onde o efluente é proveniente de um Tanque Séptico.

Os Filtros Anaeróbios indicados na Tabela 12 foram desenvolvidos por Tonetti (2005) para tratamento inicial de efluentes, com utilização de bambu em seu material de recheio. Associados a este Filtro Anaeróbio foram desenvolvidos estudos para o tratamento final com Filtros de Areia (TONETTI, 2010) e Escoamento Superficial (TONETTI, 2012).

Em Paulo et al. (2013) houve a segregação entre águas negras e cinzas para o tratamento o efluente, pois usualmente o modelo de Tanque de Evapotranspiração é utilizado para o tratamento de águas negras. Sendo assim, destinou-se nesse estudo as águas cinzas à duas *Wetlands* Construídas.

6.1 CARACTERIZAÇÃO DAS ALTERNATIVAS EXISTENTES PARA TRATAMENTO LOCAL DE EFLUENTES

Nesta seção serão apresentadas as principais características das alternativas de tratamento de esgoto encontradas em literatura mais adaptáveis para o cenário rural.

6.1.1 *Wetlands* construídos

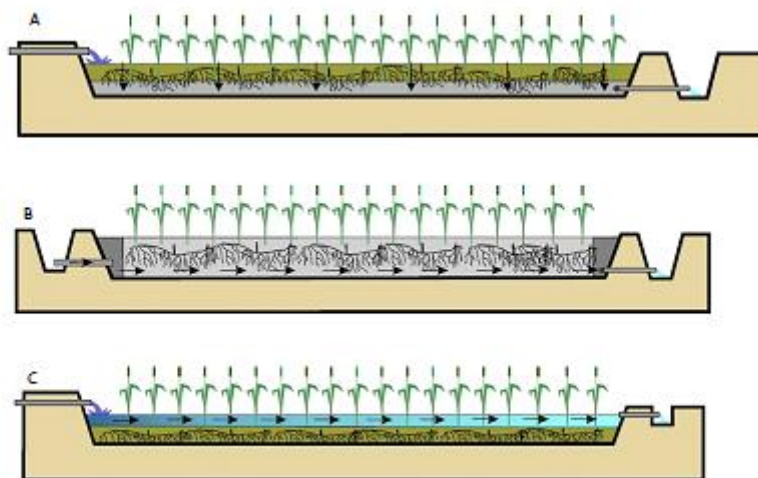
Os *Wetlands* Construídos foram efetivamente conhecidos como uma “tecnologia verde” para tratamento de águas residuais e estão sendo bastante considerados como sistemas de tratamento nos últimos anos (KUMAR; ZHAO, 2011). No Brasil, os *Wetlands* Construídos podem ser reconhecidos pelos termos zonas de raízes, filtros plantados com macrófitas, alagados naturais, terras úmidas construídas e leitos cultivados (PHILIPPI, 2007).

O tratamento de águas residuais através de *Wetlands* Construídos são sistemas artificiais que consistem em lagoas ou canais superficiais com plantas aquáticas e que dependem de processos naturais microbianos, biológicos, físicos e químicos para tratar as águas residuais. Usualmente possuem substratos como rocha, cascalho e areia para controlar a direção do fluxo, o tempo de deposição de líquidos e o nível de água (AGENCY, 2000).

Os sistemas *Wetlands* apresentam vantagens de serem sistemas descentralizados, de baixo custo de implantação, operação e manutenção. A construção utiliza-se materiais locais e pode empregar trabalhadores locais devido à facilidade de implantação. São também aspectos favoráveis a aceitação pelas pessoas devido a estética agradável e ainda o reuso da água tratada para fins não potáveis. Além disso, trata-se de um sistema natural que se baseia na decomposição de elementos contidos nos esgotos em ecossistemas naturais sem necessidade de emprego de energia, pois os processos ocorrem de forma espontânea (PHILIPPI, 2007; SHRESTHA, 1999).

As *Wetlands* Construídas podem ser classificadas em três tipos, de acordo com o fluxo do efluente no sistema. São elas: (i) *Wetlands* de fluxo superficial, (ii) *Wetlands* de fluxo subsuperficial na vertical e (iii) na horizontal. As *Wetlands* Construídas de fluxo superficial simulam as lagoas do tipo pântano. Nas *Wetlands* de fluxo subsuperficial, o efluente atravessa um leito filtrante composto de areia ou algum solo hidráulico cultivado com vegetação do tipo macrófita. A representação dos tipos de *Wetlands* Construídas pode ser verificada na Figura 8.

Figura 8: Sistema com macrófitas de fluxo subsuperficial vertical (A), sistema com macrófitas de fluxo subsuperficial horizontal (B) e sistema com macrófitas de fluxo superficial (C).



Fonte: Salati (2009).

A maioria dos estudos desenvolvidos no Brasil aplicam as *Wetlands* Construídas de fluxo horizontal como etapa de tratamento secundário. Com relação às dimensões do sistema, geralmente são adotados a geometria retangular, profundidade máxima de 1,50 m e comprimento maior que a largura (SEZERINO et al., 2015).

Na Tabela 5 apresenta-se uma faixa de valores para a relação da área per capita no dimensionamento de *Wetlands* Construídos considerando as águas sanitárias compostas por esgoto doméstico ou sanitário.

Tabela 5: Faixa de valores extremos da relação área per capita em *Wetlands* Construídos de fluxo horizontal reportados na literatura brasileira.

Afluentes	Relação área per capita (m ² /pessoa)	Vazão (L/dia)	Área (m ²)	Autores
Esgoto Doméstico ou Sanitário	Mínimo: 0,14	6840,00	6,00	Avelar et al. (2009 a,b)
	Máximo: 8,0	450,00	24,00	Borges et al. (2008)

Fonte: Adaptado de Sezerino et al., (2015).

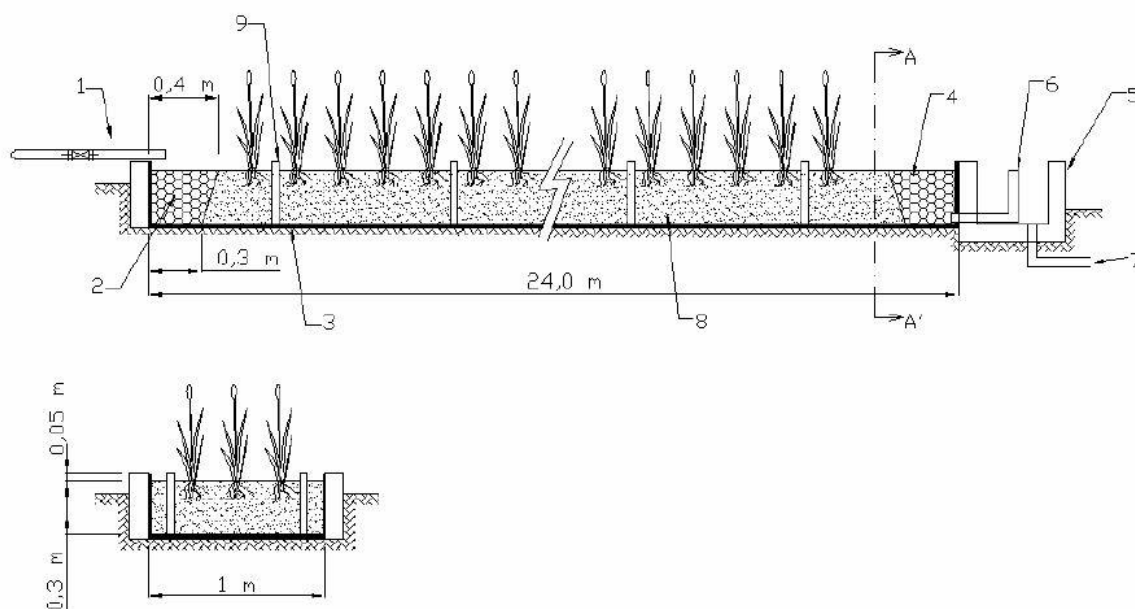
O *Wetland* Construído apresentado por Brasil (2005) foi construído para tratamento secundário do esgoto doméstico na cidade de Viçosa MG. Foram construídos quatro sistemas com fluxo subsuperficial horizontal com diferentes tempos de retenção hidráulica, no entanto para este estudo somente um *Wetland* foi analisado. O sistema como um todo conta também com um tanque séptico de alvenaria de 8,74 m³ para tratamento primário do efluente

construído (ABNT, 1993), um caixa de fibra de vidro para armazenamento da água residual tratada.

O sistema de tratamento de esgoto doméstico possui dimensões de 0,35 m de largura x 1,0 m de largura x 24,0 m de comprimento, inclinação de 0,50% e foi posicionado sobre o solo impermeabilizado com geomembrana de policloreto de vinila (PVC), com espessura de 0,50 mm. O meio de suporte foi feito com brita #0 (diâmetro – D60 = 7,0 mm, Cu D60/D10 = 1,6 e volume de vazios de 48,4%, condutividade hidráulica saturada $K_{s20} = 7.970 \text{ m d}^{-1}$) de altura 0,30 m, conforme a Figura 9. A Figura 10 apresenta um esquema do corte do tanque com sua respectiva inclinação, volume e dimensões.

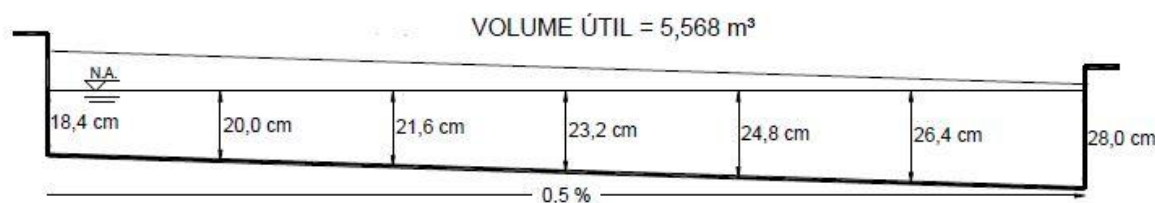
A distribuição do efluente oriundo de um tanque séptico foi feita sobre a zona de entrada preenchida com brita #2. A macrófita cultivada no tanque foi a espécie taboa (*Typha sp*) com densidade de 8,5 propágulos/m². Ao longo da estrutura do *Wetland* foram dispostos quatro tubos de PVC para coleta de amostras do líquido em tratamento.

Figura 9: Esquema do *Wetland* Construído: (1) dispositivo de distribuição do afluente; (2) zona de entrada; (3) geomembrana impermeável; (4) zona de saída; (5) caixa de coleta; (6) dispositivo de descarga e controle do nível; (7) rede de esgotamento do efluente; (8) meio suporte; (9) pontos internos de coleta de amostra do líquido residente.



Fonte: Brasil (2005).

Figura 10: Representação esquemática do corte do *Wetland* Construído.



Fonte: Brasil (2005).

O *Wetland* foi alimentado com efluente doméstico proveniente de fossas sépticas e com tempo de detenção hidráulica de 1,9 dias. Para a avaliação do desempenho do *Wetland* Construído as seguintes variáveis foram quantificadas: demanda química de oxigênio (DQO), sólidos suspensos totais (SST), Nitrogênio Total (N) e fósforo (P). A Tabela 6 apresenta a concentração dos poluentes no efluente com sua respectiva remoção.

Tabela 6: Eficiência na remoção de poluentes pelo *Wetland*.

Poluentes	Eficiência (%)
DQO (mg/L)	87
SST	91
N	33
P	35
Coliformes fecais	95,2

Fonte: Adaptado de Brasil et al. (2005).

A Tabela 7 apresenta o levantamento quantitativo e qualitativo para construção do *Wetland* Construído. Esse levantamento considera a construção das laterais em alvenaria, e também o valor estimado para a Fossa Séptica em concreto pré-moldado para tratamento primário do efluente. É estimado também o preço de uma caixa de fibra de vidro para armazenamento do efluente após o tratamento por meio do sistema de *Wetland*.

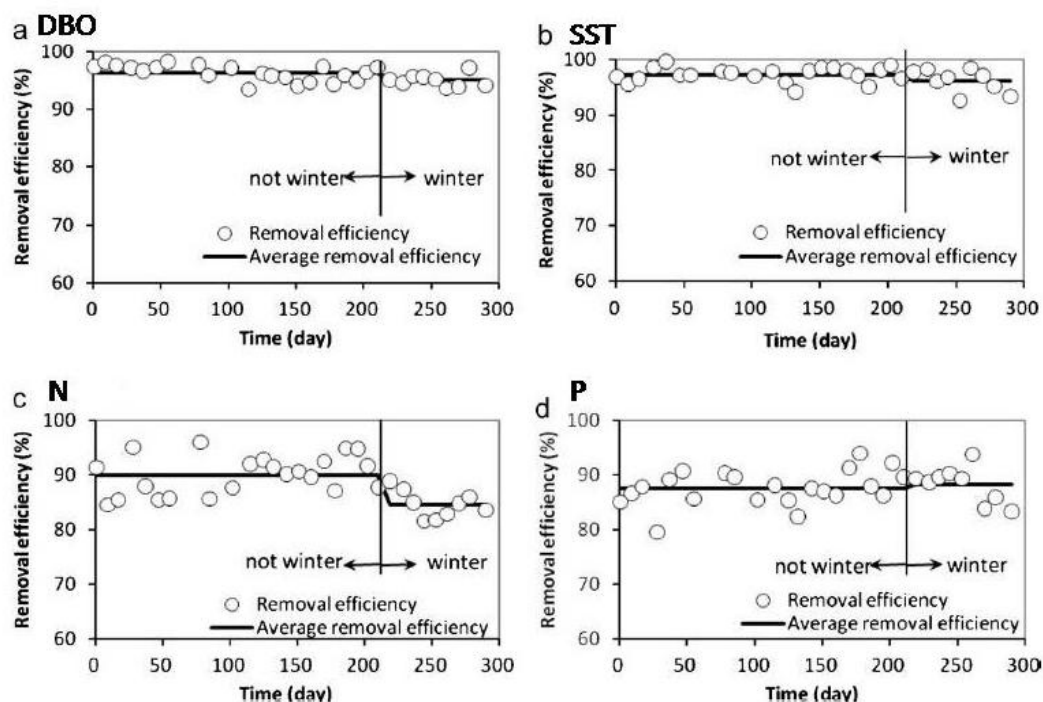
Tabela 7: Levantamento qualitativo e quantitativo dos materiais do *Wetland* Construído

Item	Descrição	Qtd.	Custo
1	Bloco cerâmico (14x19x19 cm)	505 unid	R\$ 722,50
2	Cimento	50 kg	R\$ 17,95
3	Areia	0,15m ³	R\$ 9,57
4	Geomembrana PVC 0,5 mm	40 m ²	R\$ 194,40
5	Brita 0	5,4 m ³	R\$ 333,00
6	Brita 2	0,24 m ³	R\$ 11,60
7	Válvula de gaveta esfera 2''	1 unid	R\$ 64,14
8	Tubo PVC 2''	1 unid	R\$ 54,00
9	Tubo PVC 40 mm	1 unid	R\$ 24,00
10	Tubo PVC 4''	1 unid	R\$ 115,68
11	Caixa fibra de vidro 1000 L	1 unid	R\$ 318,70
12	Fossa Séptica em concreto pré-moldado para 5 contribuintes	1 unid	R\$ 403,09
Custo Total			R\$ 2268,63

* Preço estimado com base na tabela SINAPI (Sistema Nacional de Pesquisa e Custos e Índices da Construção Civil, 2017).

Fonte: Autoria Própria.

Figura 11: Contribuição média para a remoção de poluentes por tanque de sedimentação e *Wetland* ((a) demanda bioquímica de oxigênio (BOD), (b) sólidos suspensos totais (TSS), (c) nitrogênio (N), e (d) fósforo (P)).



Fonte: Wu et al. (2011).

Wu (2011) apresentou um estudo sobre um *Wetland* instalado em uma propriedade rural de uma família em Beijing, China. O intuito foi tratar somente as águas cinzas desta residência, ou seja, as águas residuais oriundas da cozinha e lavanderia, excluindo as águas negras do banheiro. O custo total do projeto foi de 259 dólares, incluindo a estrutura do wetland, cascalho, areia e instalação. A eficiência na remoção de DBO, SST, N e P foram de 96,3%, 97,3%, 90% e 87,6% respectivamente no período não correspondente ao inverno. Durante o inverno a eficiência na remoção de DBO, SST, N e P passou a ser de 95.0%, 96.2%, 84.6%, 88.2% respectivamente (Figura 11).

6.1.2 Fossas sépticas

As Fossas Sépticas consistem em um método de tratamento de efluentes sanitário considerado ideal para as áreas rurais e pequenas comunidades (JOSÉ et al., 2006). O sistema consiste em um tanque de fluxo horizontal com tratamento dos resíduos por digestão anaeróbia e possuem respaldo de normas técnicas como, por exemplo, a ABNT (1997) e ABNT (1993). São acoplados ao tanque séptico um sistema para tratamento final tais como valas de filtração, filtro anaeróbio, filtro aeróbio ou podem ser encaminhados para disposição final em valas de infiltração, sumidouros ou círculos de bananeiras (MARTINETTI; SHIMBO; TEIXEIRA, 2007).

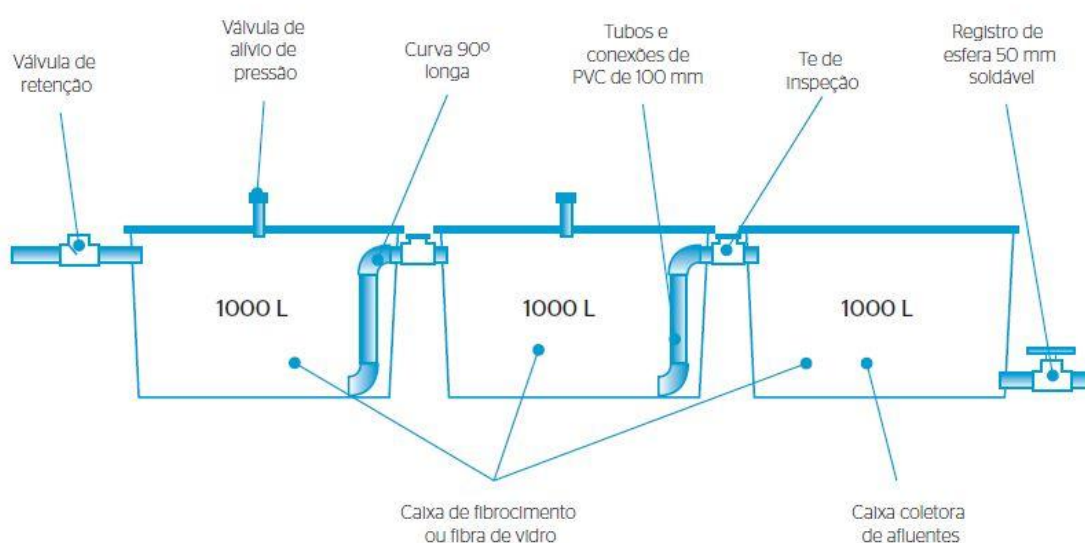
A Fossa Séptica Biodigestora é uma alternativa desenvolvida pela Embrapa Instrumentação (NOVAES et al., 2002), com o objetivo de tratar o esgoto sanitário com base em um sistema anaeróbio. O sistema é composto por 3 caixas d'água de 1000 L cada conectadas ao vaso sanitário da residência, sendo que a última delas serve para a coleta do biofertilizante. As caixas devem ser conectadas por tubos de PVC e vedadas para impedir vazamento do efluente. Além disso, devem ficar enterradas no solo para manter o isolamento térmico. A Figura 12 apresenta o corte esquemático de uma Fossa Séptica Biodigestora desenvolvida pela Embrapa.

Mensalmente deve ser adicionado ao sistema uma solução composta por 10 L de esterco e 10 L de água pois essa mistura serve como inoculante de microorganismos presentes nos excrementos bovinos, que digerem a matéria orgânica presente nos dejetos lançados no vaso sanitário. Dessa forma, são eliminados os germes patogênicos e também possíveis odores oriundos da decomposição anaeróbia (FAUSTINO, 2007).

O efluente produzido pela Fossa Séptica Biodigestora é também chamado de biofertilizante. Esse produto vem sendo aplicado no preparo de solos e adubação de pomares e

possui eficiência comparável aos adubos comercializados a base de nitrogênio, fósforo e potássio (NPK), no entanto devem seguir os requisitos da legislação CONAMA 357 (2006) para uso de produtos de esgoto sanitário. Sendo assim, o conceito de agricultura sustentável é associado a esse sistema de tratamento de esgoto, pois o efluente pode ser reutilizado de maneira a melhorar as condições do solo e proporcionar nutrientes essenciais às plantas (FAUSTINO, 2007).

Figura 12: Representação dos componentes da Fossa Séptica Biodigestora.



Fonte: Galindo et al. (2010).

Savegnago e Ferri (2014) estudaram a eficiência na remoção de poluentes do efluente doméstico de uma residência utilizando uma Fossa Séptica Biodigestora. A eficiência de remoção foi calculada pela média de três análises para cada parâmetro, tanto para os dados do esgoto bruto quanto para o esgoto tratado (Tabela 8).

Tabela 8: Eficiência na remoção de poluentes pela Fossa Séptica Biodigestora.

Poluentes	Eficiência (%)
DQO (mg/L)	96,4
SST	80,9
N	88,5
P	82,3
Coliformes fecais	85

Fonte: Adaptado de Savegnago; Ferri (2014); Leonel; Martelli; Silva (2013).

A Tabela 9 traz o levantamento qualitativo de materiais necessários para construção da Fossa Séptica Biodigestora. Considerou-se uma residência padrão de 5 pessoas para tomar como referência as determinações de dimensões do tanque desenvolvida por Novaes et al., (2002).

O impacto da construção da fossa séptica biodigestora nos corpos hídricos foi avaliado em uma pesquisa para analisa as condições dos corpos d'água na bacia hidrográfica do córrego Pau Grande em Ouro Branco, Minas Gerais. O monitoramento foi realizado no período de 2005 e 2009, pois foram construídas 20 unidades de fossas sépticas biodigestoras numa comunidade rural da região. Os resultados das análises mostraram que houve um aumento de mais de 100% de oxigênio dissolvido e redução de mais de 800% na quantidade de coliformes fecais em pontos a jusante das fossas, mostrando uma melhoria na qualidade dos recursos hídricos em áreas rurais com a adoção desta técnica (VICQ; LEITE, 2014).

Tabela 9: Levantamento qualitativo e quantitativo dos materiais da Fossa Biodigestora.

Item	Descrição	Qtd.	Custo
1	Caixa D'água 1000 L	3 unid	R\$ 956,00
2	Curva 90° 4''	2 unid	R\$ 11,72
3	Flange PVC 2''	1 unid	R\$ 10,53
4	Válvula de retenção	1 unid	R\$ 110,00
5	T de PVC 4''	2 unid	R\$ 22,24
6	Tubo de PVC 4''	1 unid	R\$ 115,68
7	Registro de esfera 4''	1 unid	R\$ 51,00
8	Silicone para vedação (280g)	1 unid	R\$ 10,97
9	Flange PVC 1''	2 unid	R\$ 10,94
10	Cola PVC (280g)	1 unid	R\$ 13,00
11	CAP PVC 1''	2 unid	R\$ 5,10
Custo Total			R\$ 1317,18

Preço estimado com base na tabela SINAPI (2017).

Fonte: Autoria Própria.

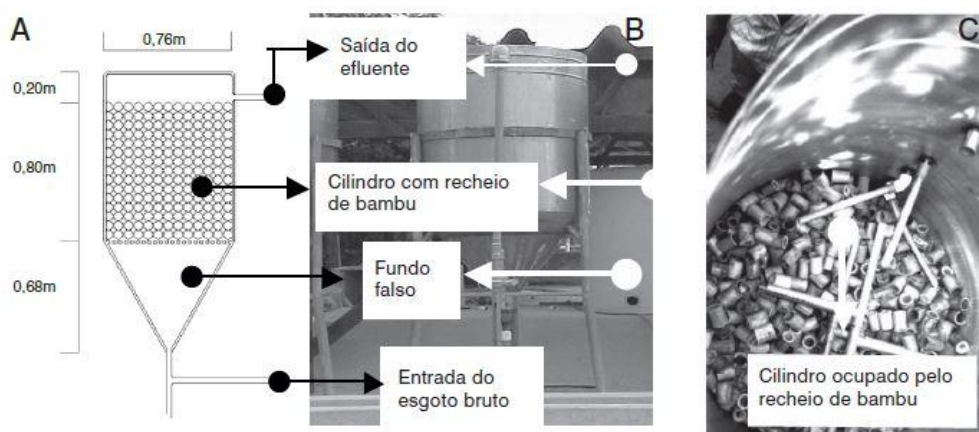
Costa (2014) conduziu um estudo para avaliar o impacto da fossa séptica biodigestora nos âmbitos social, ambiental e econômico no Brasil. Conclui-se que a construção deste tipo de medida saneadora poderia evitar cerca de 250 mortes e 5,5 milhões de casos de diarreias. Além disso, verifica-se uma diminuição de 129 mil toneladas de resíduos nos corpos hídricos, e um retorno de R\$1,60 em renda para cada R\$1,00 investido na construção do sistema, e ainda a geração de cerca de 39 mil empregos.

6.1.3 Filtro anaeróbico associado a filtro de areia

Várias alternativas para o tratamento de esgoto de forma barata, baseada em estudos fundamentados e sem necessidade de pessoas especializadas para construção e operação estão sendo analisadas atualmente. Nour e Camargo (2001) desenvolveram um método com uso de bambu para recheio de filtros anaeróbios. Essa técnica possui vantagens em relação ao custo, baixa produção de lodo e pouco consumo de energia, no entanto, verificou-se que a remoção de patógenos, nutrientes e matéria orgânica não se consolidou de maneira satisfatória. Sendo assim, Tonetti (2005) fez a associação do filtro anaeróbio com um filtro de areia para aumentar a eficiência do tratamento de esgoto e mesmo assim manter as vantagens de baixo custo e facilidade de implantação do sistema.

A Figura 13 mostra o esquema do filtro anaeróbio com recheio de bambu cortados em tamanhos de aproximadamente 0,05 m de comprimento e instalado no Laboratório de Protótipos Aplicados ao Tratamento de Águas e Efluentes de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp. O esgoto oriundo de algumas instalações da universidade era depositado em uma caixa de 1000 L, em seguida era direcionado a três filtros anaeróbios feitos de aço-inox com volume total de 500 L e fundo cônico, com fluxo ascendente.

Figura 13: Esquema de um filtro anaeróbio com recheio de bambu (A) e sua vista externa (B) e interna (C).



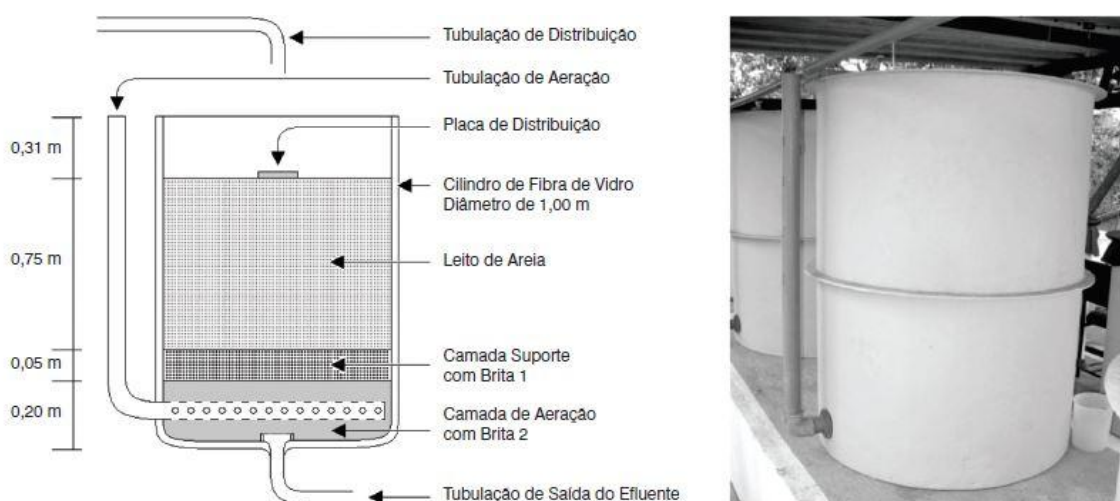
Fonte: Tonetti (2005).

O filtro de areia é uma alternativa para pós-tratamento de efluentes simplificado (AUSLAND et al., 2002). Tonetti (2012) realizou a implantação de três filtros de areia com 1000 L de volume cada para receber o líquido proveniente dos filtros anaeróbios preenchidos com anéis de bambu. Ao sair dos filtros anaeróbios o efluente era direcionado a um recipiente

de dosagem de volume total 60 L, sendo que da base desse recipiente partia a tubulação que fazia a disposição do efluente sobre os filtros de areia. Houve a instalação de uma placa de madeira de 20 cm para o choque do líquido antes de atingir o leito de areia, de modo que as gotículas pudessem ter o espalhamento uniforme. As caixas cilíndricas do filtro de areia possuíam diâmetro de 1m e um orifício na parte inferior para saída do efluente.

O leito era composto de uma camada de 20 cm de Brita 2 (diâmetro efetivo (D10) de 16,12 mm, coeficiente de desuniformidade (CD) de 1,89 e coeficiente de vazios (Cv) de $45,80 \pm 0,40\%$) seguida de uma camada de 5 cm de Brita 1 (D10=7,51 mm, CD de 1,66 e Cv de $44,08 \pm 0,38\%$). O leito de areia utilizado tinha profundidade de 75 cm (TONETTI et al., 2010). A areia empregada (média) possuía as seguintes características: um D10= 0,18 mm, CD de 3,14 e Cv de $28,6 \pm 0,9\%$. Foi instalado também uma tubulação de 50 cm de diâmetro com furos em toda sua extensão penetrando na camada de Brita 2 para aumentar a aeração do sistema. Na Figura 14 está representado o filtro de areia com suas respectivas camadas.

Figura 14: Filtro de areia com a apresentação de suas camadas constituintes.



Fonte: Tonetti (2012).

A Tabela 10 apresenta a eficiência dos Filtros de Areia em remoção dos poluentes presentes no esgoto doméstico.

Tabela 10: Eficiência na remoção de poluentes pelo Filtro de Areia

Poluentes	Eficiência do Filtro de Areia(%)
DQO (mg/L)	73
SST	75,5
N	0*
P	Não há valores publicados.
Coliformes fecais	96,7

*O N-total afluente não apresentava diferença significativa com o N-total efluente (Kruskal-Wallis 5%).

Fonte: Tonetti et al. (2013); Tonetti et al. (2012).

A Tabela 11 contém os custos e insumos envolvidos para implantação deste sistema, desde a confecção dos filtros anaeróbios utilizados como tratamento primário.

Tabela 11: Levantamento qualitativo e quantitativo dos materiais do Filtro Anaeróbio associado a Filtros de Areia

Item	Descrição	Qtd.	Custo
1	Tanque cilíndrico de fundo cônico 500 L	3 unid	R\$ 2310,00
2	Recipiente dosagem de 60 L	1 unid	R\$ 157,50
3	Tubo de PVC 4''	1 unid	R\$ 115,68
4	Caixa de Fibra de Vidro 1000 L	4 unid	R\$ 1274,67
5	Areia Média	2,4 m ³	R\$ 153,12
6	Tubo PVC 2''	1 unid	R\$ 54,00
7	Brita 2	0,64 m ³	R\$ 31,00
8	Brita 1	0,16 m ³	R\$ 7,72
Custo Total			R\$ 4103,69

Preço estimado com base na tabela SINAPI (2017).

Fonte: Autoria Própria.

Matamoros (2009) estudou a eficiência da remoção de 13 produtos farmacêuticos e de cuidados pessoais e DBO, SST e N para alguns sistemas domésticos de tratamento de águas residuais, incluindo o sistema com filtros de areia. Verificou-se que a remoção de DBO e SST obtida pelo filtro de areia é muito eficiente, ultrapassa 95%. A remoção dos compostos farmacêuticos por sua vez ultrapassou 80%.

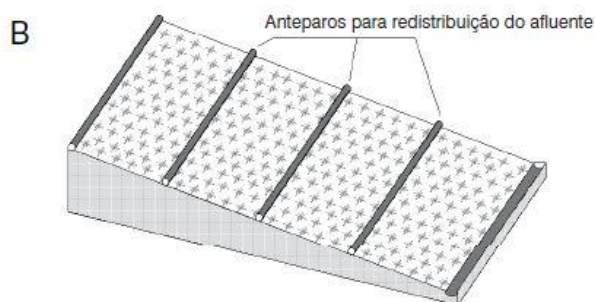
6.1.4 Filtro anaeróbio associado a escoamento superficial

Sistemas de Escoamento superficial são uma alternativa para complementar o tratamento de efluentes, pois apresentam vantagens tais como baixos custos de implantação e manutenção, operação fácil e baixo consumo de energia. Este sistema é apropriado para tratamento de esgotos em pequenas comunidades, a cobertura vegetal pode ser utilizada em culturas agrícolas e não há produção de odores e lodo (TAEBI; DROSTE, 2008; TONETTI et al., 2009).

O processo de tratamento das águas residuais por escoamento superficial é uma associação de processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem a medida que o fluxo do efluente percorre por gravidade a superfície vegetativa de uma encosta com terreno de baixa permeabilidade (SURAMPALLI et al., 1996).

Tonetti, Filho e Stefaunutti (2012) desenvolveram uma rampa para escoamento superficial (Figura 15) do efluente oriundo de filtros anaeróbios preenchidos com bambu (Figura 13) e descritos no item 6.1.4 deste estudo. A rampa possui declividade de 3,50% e dimensões de 4,35 m de largura por 40 m de comprimento, sendo que a cada 5 m houve a instalação de barreira de concreto no sentido transversal para regularizar o fluxo do escoamento (PAGANINI, 1997). O efluente foi distribuído no terreno através de um tubo de PVC com perfurações ao longo de todo seu comprimento. A disposição do efluente se dava em período de 8 horas diárias, 5 dias por semana e a coleta de efluente tratado era realizada por meio de uma canaleta instalada no final da rampa. A vegetação escolhida foi gramínea Tifton 85 (*Cynodon spp*) por resistir a solos encharcados e oscilações de temperatura (TONETTI; FILHO; STEFANUTTI, 2012).

Figura 15: Sistema de escoamento superficial em vista (A) e esquemático (B).



Fonte: Tonetti (2012).

A eficiência na remoção de poluentes obtida pelos filtros anaeróbios e pela rampa de escoamento é apresentada na Tabela 12.

Tabela 12: Eficiência na remoção de poluentes pela Rampa de Escoamento Superficial

Poluentes	Eficiência dos Filtros	Eficiência da Rampa (%)
	Anaeróbios (%)	
DQO (mg/L)	50	70
SST	66,1	56,7
N	10	78
P	25	82
Coliformes fecais	*	*

Fonte: Tonetti et al. (2009).

A Tabela 13 apresenta os custos e insumos envolvidos para implantação deste sistema, desde a confecção dos filtros anaeróbios utilizados como tratamento primário. Os custos para confecção da rampa em si não foram considerados relevantes para composição da Tabela 14, uma vez que só é necessário que se faça a inclinação e o plantio da vegetação.

Tabela 13: Levantamento qualitativo e quantitativo dos materiais do Filtro Anaeróbio associado a rampa de Escoamento Superficial

Item	Descrição	Qtd.	Custo
2	Tanque cilíndrico de fundo cônico 500 L	3 unid	R\$ 2310,00
4	Tubo de PVC 4’’	2 unid	R\$ 231,36
Custo Total			R\$ 2541,36

Preço estimado com base na tabela SINAPI (2017).

Fonte: Autoria Própria.

Surampalli e Fellow (1996) estudaram a influência das variações sazonais na eficiência no tratamento de esgoto por meio do escoamento superficial. Para este estudo foi considerado uma rampa de inclinação de 2% e comprimento de 341,3m. Durante os dias mais quentes a remoção média de DBO e SST foi de 89% e 85% respectivamente. Em temperaturas mais frias a porcentagem de remoção para esses parâmetros foi de 81% e 69%, respectivamente. Os resultados indicaram o sistema de escoamento superficial como uma excelente metodologia para tratamento de águas residuais.

Taebi e Droste (2008) avaliaram a remoção de poluentes por meio de rampas de escoamento superficial caso elas fossem usadas como tratamento primário ou secundário de

efluentes. Para seu uso como tratamento primário as remoções médias de DBO, SST, N e P foram de 52,9%, 66,5%, 44,4% e 39,8%, respectivamente. No caso de efluente oriundo de tratamento primário de lodo ativado as remoções foram de 52,9%, 52,9%, 44,4% e 39,8%.

6.1.5 Tanque de evapotranspiração

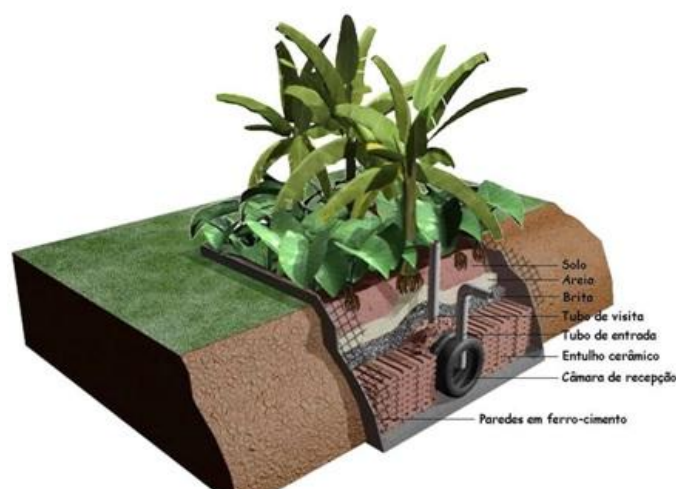
O Tanque de Evapotranspiração (TEvap) é utilizado para o tratamento domiciliar de águas negras. O sistema é composto por um tanque retangular impermeabilizado preenchido por camadas de substrato, onde são plantadas diferentes espécies vegetais. O sistema recebe o efluente dos vasos sanitários pela parte inferior e enquanto percola o substrato passa por processos naturais de degradação microbiana da matéria orgânica, mineralização de nutrientes, absorção e evapotranspiração pelas plantas (GALBIATI, 2009).

As justificativas para a escolha da tecnologia são: pequena geração de resíduos finais, alta eficiência na remoção da matéria orgânica, custos reduzidos para implantação e boa adaptação das espécies vegetais (COSTA, 2014).

As águas negras contêm alta concentração de patógenos e carga orgânica, sendo assim para que ocorra o tratamento adequado a maioria dos sistemas utiliza-se de um pré-tratamento para redução dos sólidos e um pós-tratamento para complementar a retirada de nutrientes e patógenos nocivos ao ambiente. O TEvap é uma alternativa facilitadora uma vez que consiste em uma câmara que dispensa o pós-tratamento do efluente, pois é dimensionado para total absorção dos poluidores pelas plantas (GALBIATI, 2009).

O TEvap possui dimensões de 1,5 m de profundidade e 2 m de largura, sendo o comprimento um valor proporcional ao número de usuários. A Figura 16 ilustra o corte transversal do Tanque de Evaporação proposto por Galbiati (2009) para o tratamento de águas negras em uma residência. Os pneus foram dispostos longitudinalmente formando uma câmara, sendo que a tubulação de entrada do efluente foi ali posicionada. Nesta câmara ocorre a deposição de materiais sólidos que podem causar o entupimento do sistema. Ao redor da câmara verifica-se uma camada de entulho, seguida de um substrato composto de 10 cm de brita, 10 cm de areia e 35 cm de solo. Verifica-se também um tubo de visita para manutenção e coleta de amostras do efluente final. As plantas utilizadas neste sistema foram bananeiras (*Musa cavendishii*), taiobas (*Xanthosoma sagittifolium*) e beri (diversas espécies do gênero *Canna*).

Figura 16: Corte transversal de TEvap.



Fonte: Galbiati (2009).

A eficiência na remoção de poluentes obtida pelo TEvap é apresentada na Tabela 14.

Tabela 14: Eficiência na remoção de poluentes pelo TEvap.

Poluentes	Eficiência (%)
DQO (mg/L)	43,87
SST	90
N	32
P	20,7
Coliformes fecais	28

Fonte: Adaptado de Galbiati (2009).

A Tabela 15 traz o levantamento qualitativo de materiais necessários para construção do Tanque de Evapotranspiração. Considerou-se uma residência padrão de 5 pessoas para tomar como referência as determinações de dimensões do tanque desenvolvida por Costa (2014). Segundo ele, a área do TEvap para este caso deve ser de 14,5 m².

Tabela 15: Levantamento qualitativo e quantitativo dos materiais do TEvap.

Item	Descrição	Qtd.	Custo
1	Tubo PVC 4’’	1 unid	115,68
2	Tubo PVC 2’’	1 unid	54,00
3	Luva PVC 4’’	2 unid	25,62
4	Curva 90° 4’’	1 unid	5,86
5	CAP PVC 4’’	1 unid	5,76
6	T PVC 4’’	1 unid	39,78
7	Brita nº1	4,7 m ³	226,92
8	Areia Média	6,2 m ³	395,56
9	Pedra de mão/ Entulho	7 m ³	-
10	Pneu usado	44	-
11	Solo	5,8 m ³	-
12	Tela de galinheiro Fio 22	43 m ²	334,11
13	Cimento CP II	100kg	35,90
Custo Total			R\$ 1239,19

Preço estimado com base na tabela SINAPI (2017).

Fonte: Costa (2014).

A utilização de pneus reversíveis constitui uma alternativa econômica e ambientalmente favorável dentro da proposta de reutilização de materiais. Além disso, as plantas são insumos fáceis de serem encontrados e aplicados no meio rural e por isso também não houve acréscimo de custos devido a elas. Além disso, como benefício direto as famílias poderão utilizar, por exemplo, os frutos produzidos pelas bananeiras introduzidas no TEvap.

Tanques de Evapotranspiração foram implantados na região da Austrália Ocidental para o tratamento de efluentes domésticos em comunidades indígenas. Esse sistema é indicado para esse local devido à presença de solos com baixa permeabilidade. Foi feito um monitoramento de um estudo de caso durante dois anos e resultou em efluentes reutilizáveis para vegetação e produção de alimentos (ANDA; MATHEW; HO, 2001).

Um estudo desenvolvido por Bernardes (2014) apresenta um TEvap construído em um abrigo no município de Campo Grande, Mato Grosso do Sul com capacidade para receber os efluentes do vaso sanitário (águas negras) de uma residência de duas pessoas. A remoção de DQO do sistema pode atingir 76% em um vazão até 11 vezes maior do que a projetada, embora o tanque não seja capaz de suportar essa quantidade de efluente. Quando o sistema é exposto a vazões de projeto, ocorre o funcionamento ideal, sem ocorrência de extravasamento.

6.1.6 Avaliação da sustentabilidade dos sistemas de tratamento de esgoto

A Tabela 16 apresenta a atribuição de valores para os indicadores de sustentabilidade em cada sistema de tratamento de esgoto apresentado no estudo. Os indicadores de 9 a 17 são grandezas qualitativas, sendo assim, seus valores foram atribuídos segundo a associação apresentada na seção 5.1 deste trabalho.

Tabela 16: Indicadores de sustentabilidade inicial para cada sistema de tratamento de esgoto avaliado neste estudo

Indicador*	Wetlands Construídos	Fossa Séptica Biodigestora	Filtros Anaeróbios associados à Escoamento Superficial	Filtros Anaeróbios associados à Filtro de Areia	TEvap
1 (R\$)	2268,63	1317,18	2541,36	4103,69	1239,19
2 (R\$)	-	-	-	-	-
3 (%)	0,87	0,96	0,70	0,73	0,44
4 (%)	0,91	0,81	0,58	0,76	0,90
5 (%)	0,33	0,89	0,78	0	0,32
6 (%)	0,35	0,82	0,82	0	0,21
7 (KWh)	-	-	-	-	-
8 (m²)	24	12	174	3	14,5
9 (Kg)	1	1	1	1	1
10	7	7	7	7	1
11	7	7	7	7	7
12	7	7	7	7	7
13	3	3	3	3	3
14	1	1	1	1	1
15	1	3	7	7	1
16	5	5	5	5	5
17	7	3	5	5	5

*1- Custo do Investimento; 2- Custo de manutenção; 3- Eficiência na remoção de Matéria Orgânica; 4- Eficiência na remoção de Sólidos Suspensos; 5- Eficiência na remoção de Nitrogênio; 6- Eficiência na remoção de Fósforo; 7- Consumo de Energia; 8- Área requerida; 9- Produção de lodo; 10- Potencial de reuso da água; 11- Potencial de recuperação de produtos; 12- Confiabilidade; 13- Odor; 14- Barulho; 15- Impacto visual; 16- Aceitação das pessoas; 17- Complexidade.

Fonte: Autoria Própria.

6.1.6.1 Considerações acerca dos indicadores

O custo de mão de obra não foi estimado, pois se considerou a construção participativa (sob a forma de mutirão). Além disso, não há custos diretos com operação e manutenção, mas eventualmente podem ser realizadas análises do efluente para verificar a eficiência do sistema na remoção de cargas poluentes.

Nenhum dos sistemas de tratamento de esgoto utilizou-se de consumo de energia para seu funcionamento. O volume de lodo produzido não foi estimado em nenhum trabalho avaliado, sendo assim considerou-se como uma grandeza qualitativa. Estimou-se uma produção “Muito Baixa” de lodo, determinada na Tabela 17 pelo valor “1”. Nenhum dos sistemas de tratamento de esgoto produz barulho, por isso esse indicador também teve a avaliação “Muito Baixa” (1).

O Potencial de reuso da água foi avaliado como “Alto” (7) para todos os sistemas de tratamento de esgoto, exceto o TEvap avaliado como “Muito Baixo” (1) devido a não produção de efluente final, ou seja, o efluente tratado no TEvap teve sua incorporação de nutrientes à biomassa das plantas (COSTA, 2014). O sistema de escoamento superficial e o filtro de areia produziram efluente adequado ao lançamento em corpos hídricos (TONETTI et al., 2012; TONETTI; FILHO; STEFANUTTI, 2012). O efluente produzido com o emprego de filtros de areia é viável para irrigação de cereais e culturas a serem industrializadas, silviculturas e pomares.

No caso dos Wetlands o efluente apresentou qualidade para uso na fertirrigação de culturas agrícolas (BRASIL et al., 2005). Para o fossa séptica biodigestora, o efluente irá compor o biofertilizante que poderá ser utilizado em pomares e compostagem de solos.

O potencial de recuperação dos produtos também foi avaliado como “Alto” (7), pois está relacionado com a produção de compostos que podem ser reutilizados pelas plantas empregadas nos sistemas, tais como Wetlands, Escoamento Superficial. No caso do TEvap foi avaliado como “Muito Baixo” pois o produto da decomposição não é liberado, sendo totalmente absorvido pelas plantas do sistema. A confiabilidade dos sistemas de tratamento de esgotos também foi avaliada como “Alta” (7), pois eles são construídos seguindo embasamento técnico criterioso.

O odor foi avaliado como “Baixo” (3) pois em sistemas que se utilizam de plantas tais como Wetlands, TEvap e Escoamento Superficial, nos primeiros dias de implantação dos sistemas, pode haver produção de odores característicos devido ao período de adaptação da

cobertura vegetal. No caso da Fossa Séptica Biodigestora pode ocorrer a eliminação de odores uma vez ao mês, quando haverá a reposição de esterco bovino na primeira caixa.

O Impacto Visual foi avaliado como “Muito Baixo” (1) nos sistemas *Wetland* e TEvap pois a cobertura vegetal confere um aspecto agradável ao sistema de tratamento e faz a composição com o cenário do ambiente rural, sem efeito negativo. No caso da Fossa Biodigestora foi atribuída a avaliação de “Baixo” (3) Impacto visual, pois a área onde o sistema é implantado deve ser isolada, e as tampas das caixas d’água ficam expostas. O tratamento com filtro de areia foi avaliado com Impacto visual “Alto” (7) pois os filtros ficam expostos à superfície do terreno. No caso do tratamento do escoamento superficial a avaliação como Impacto visual “Alto” (7) foi devido à demanda de grande extensão de terreno para a construção do sistema.

Por se tratar da implantação de sistemas alternativos, e muitas vezes desconhecidos, dentro do cenário rural a aceitação da população deve ser um parâmetro a ser avaliado com muito cuidado. É necessária, uma mudança de mentalidade para o investimento na aplicação dos sistemas de tratamento. Por isso, é interessante que se façam palestras e conscientização dos proprietários rurais em relação aos benefícios atribuídos aos cuidados com o saneamento básico, principalmente na promoção da saúde, na manutenção da qualidade das águas e no investimento em técnicas simples que podem trazer o retorno financeiro com a reutilização do efluente tratado na melhoria da qualidade dos solos. Sendo assim, foi atribuída a avaliação “Moderada” (5) ao parâmetro que avalia a aceitação das pessoas.

O parâmetro complexidade foi avaliado de forma separada para cada tratamento. O *Wetland* foi avaliado como complexidade “Alta” (7), pois precisa de um sistema de tratamento preliminar com fossa séptica, além disso, o preenchimento com brita deve evitar a compactação para que o sistema seja operado de maneira eficiente.

Foi atribuída a avaliação de complexidade “Moderada” (5) para os sistemas de Escoamento Superficial, Tanque de Areia e TEvap, pois os sistemas são fáceis de serem operados e mantidos. Com relação à Fossa Séptica Biodigestora a avaliação foi de complexidade “Baixa”, pois o sistema é adequado para instalação em zonas rurais e depende somente da colocação mensal de esterco bovino, facilmente adquirido nessas localidades.

6.1.6.2 Análise dos resultados

Os dados da Tabela 17 foram normalizados segundo as equações (1) e (2). Em seguida, utilizou-se as equações (3), (4) e (5) para determinar a sustentabilidade de cada sistema de

tratamento de esgoto de acordo com as três dimensões: econômica (EC), ambiental (AM) e social (SC). Os resultados são mostrados na Tabela 17.

Tabela 17: Indicadores compostos das dimensões avaliadas para os sistemas de tratamento de esgoto

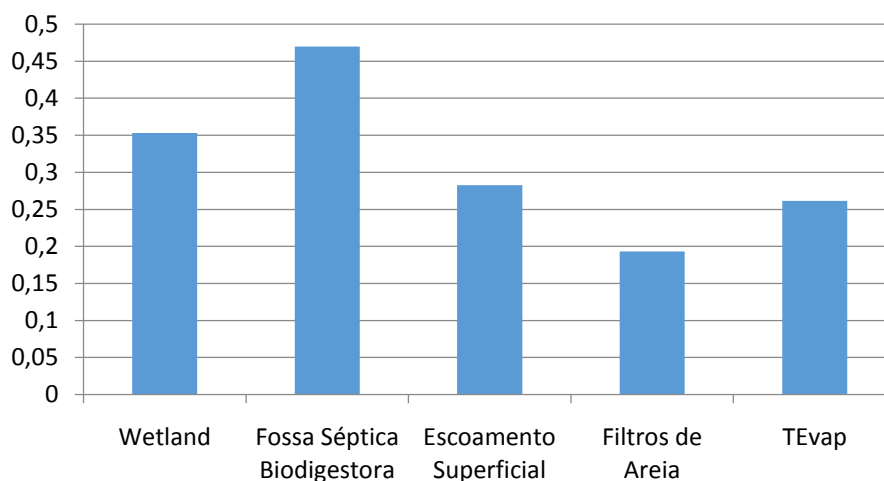
Sustentabilidade	Wetland Construída	Fossa Séptica Biodigestora	Filtros Anaeróbios associados à Escoamento Superficial	Filtros Anaeróbios associados à Filtro de Areia	TEvap
EC	0,215	0,326	0,185	0	0,336
AM	0,566	0,697	0,450	0,381	0,264
SC	0,092	0,186	0,062	0,062	0,154

Fonte: Autoria Própria.

Analisando a Tabela 17 é possível concluir que a Fossa Séptica Biodigestora apresenta-se como melhor alternativa do ponto de vista ambiental e social. No entanto, na questão econômica o TEvap é a melhor alternativa.

Sendo assim, para analisar as três dimensões como um todo foi utilizada a Equação (6) com base em um indicador composto global. Os resultados são mostrados na Figura 17 e indicam uma maior adequação da Fossa Séptica Biodigestora dentro da análise da sustentabilidade global.

Figura 17: Indicador composto de sustentabilidade global para os sistemas de tratamento de esgoto avaliados.



Fonte: Autoria Própria

7 CONCLUSÕES

A falta de saneamento básico é um problema grave que afeta várias regiões do país, principalmente as zonas rurais onde a coleta e tratamento centralizados não alcançam esses locais afastados. Além disso, é nesses lugares que se concentra grande biodiversidade e nascentes de corpos hídricos que precisam ser preservadas da contaminação por poluentes oriundos dos efluentes.

Cinco alternativas de tratamento de efluentes foram apresentadas neste trabalho para analisar a melhor solução para as zonas rurais em termos de sustentabilidade, pode-se dizer que este estudo capta o sentido da sustentabilidade ao usar um indicador que engloba as dimensões econômicas, ambientais e sociais.

A análise de diversos indicadores separados torna difícil o processo de avaliação dos sistemas de tratamento de efluentes e a comparação entre eles, sendo assim todos eles foram agregados em um indicador composto. Além disso, utilizou-se do método AHP para atribuir pesos a cada indicador de acordo com especialistas na área, o que aumenta a credibilidade dos resultados.

No âmbito econômico o TEvap foi o melhor sistema de tratamento. No entanto, ao analisar o indicador global tem-se que a Fossa Biodigestora é o tratamento que apresenta a melhor solução para as zonas rurais, enquanto que o uso de filtros de areia é o menos indicado.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7229**: projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13969**: tanques sépticos - unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos - projeto, construção e operação. Rio de Janeiro, 1997.

ANDA, M.; MATHEW, K.; HO, G. Evapotranspiration for domestic wastewater reuse in remote indigenous communities of Australia. **Water Science and Technology**, Perth, v. 44, n. 6, p. 1–10, 2001.

AUSLAND, G. et al. Intermittent filtration of wastewater - removal of fecal coliforms and fecal streptococci. **Water Research**, Kristiansand, v. 36, n. 14, p. 3507-3516, 2002.

BALKEMA, A. J. et al. Developing a model based decision support tool for the identification of sustainable treatment options for domestic wastewater. **Water Science and Technology**, Kristiansand v. 43, n. 7, p. 265–270, 2001.

BERNARDES, F. S. Avaliação do tratamento domiciliar de águas negras por um tanque de evapotranspiração (TEvap). **Revista Especialize Online IPOG**, Campo Grande, v. 1, 2014.

BOTTERO, M.; COMINO, E.; RIGGIO, V. Application of the Analytic Hierarchy Process and the Analytic Network Process for the assessment of different wastewater treatment systems. **Environmental Modelling and Software**, Torino, v. 26, n. 10, p. 1211–1224, 2011.

BRASIL. Lei Nº 11.445, de 5 de Janeiro de 2007. **Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico**. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm >. Acesso em: 20 maio 2017.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução Conama Nº 375, de 29 De Agosto de 2006. **Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados**, e dá outras providências. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res37506.pdf> > . Acesso 18 out. 2017.

BRASIL, M. D. S. **Desempenho de sistema alagado construído para tratamento de esgoto doméstico**. 2005. 160f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005a.

BRASIL, M. S. et al. Qualidade do efluente de sistemas alagados construídos, utilizados no tratamento de esgoto doméstico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Viçosa, v. 9, p. 133–137, 2005b.

BROWN, D. S. et al. **Constructed wetlands treatment of municipal wastewaters manual constructed wetlands treatment of municipal wastewaters**. Cincinnati: United States Environmental Protect Agency, 2000. 165 p.

CAIXA. **SINAPI** - Sistema nacional de pesquisa de custos e índices da construção civil. Disponível em: <<http://www.caixa.gov.br/poder-publico/apoio-poder-publico/sinapi/Paginas/default.aspx>>. Acesso em: 07 set. 2017.

CIVIL, E. et al. Desnitrificação em um sistema simplificado de tratamento de esgoto. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Campinas, v.18, p. 381–392, 2013.

COSTA, A. **Tecnologia social e políticas públicas**. São Paulo: Instituto Pólis, 2013. 284 p.

COSTA, P. S. DE A. **Desenvolvimento de uma opção de saneamento rural para pequenos agricultores de Minas Gerais (Itabira)**. 2014. 48f. Monografia (Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental) - Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2014.

COSTA, C. C. DA; GUILHOTO, J. J. M. Saneamento rural no Brasil: impacto da fossa séptica biodigestora. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, São Carlos, v. 19, p. 51–60, 2014.

FAUSTINO, A. S. **Estudos físico-químicos do efluente produzido por fossa séptica biodigestora e o impacto do seu uso no solo**. 2007. 122f. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2007.

GALBIATI, A. F. **Tratamento domiciliar de águas negras através de tanque de evapotranspiração**. 2009. 38f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) - Universidade de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2009.

GALINDO, N. et al. **Perguntas e respostas: fossa séptica biodigestora**. Disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/78899/1/Doc-49-2010.PDF>>. Acesso em: 15 abr. 2017.

HELLER, L. Relação entre saúde e saneamento na perspectiva do desenvolvimento. **Revista Ciência e Saúde Coletiva**, Belo Horizonte, p. 73–84, 1998.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **PNAD: Pesquisa nacional por amostras de domicílios**. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1956#resultado>>. Acesso em 01 maio 2017.

KUMAR, J. L. G.; ZHAO, Y. Q. A review on numerous modeling approaches for effective, economical and ecological treatment wetlands. **Journal of Environmental Management**, Dublin, v. 92, n. 3, p. 400–406, 2011.

LEONEL, L. F.; MARTELLI, L. F. DE A.; SILVA, W. T. L. DA. Avaliação do efluente de fossa séptica biodigestora e jardim filtrante. In: SYMPOSIUM ON AGRICULTURAL AND AGROINDUSTRIAL WASTE MANAGEMENT, 3., 2013, São Pedro. **Anais...** São Pedro, p. 12–15, 2013.

LIMA, F. T. DA S. Projeto de implantação de sistema de fossa séptica biodigestora e clorador no sítio Rio Manso / RJ. **Revista Fluminense de Extensão Universitária**, Vassouras, v.2, p. 11–26, 2012.

MARTINETTI, T. H.; SHIMBO, I.; TEIXEIRA, B. A. N. Tratamento local de efluentes sanitários residenciais. In: ENCONTRO NACIONAL E II ENCONTRO LATINO-

AMERICANO SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS, 4., 2007, São Carlos. **Anais...** São Carlos: p. 996–1005, 2007.

MATAMOROS, V. et al. Preliminary screening of small-scale domestic wastewater treatment systems for removal of pharmaceutical and personal care products. **Water Research**, Barcelona, v. 43, n. 1, p. 55–62, 2009.

MOLINOS-SENANTE, M. et al. Assessing the sustainability of small wastewater treatment systems: A composite indicator approach. **Science of the Total Environment**, Valencia, v. 497–498, p. 607–617, 2014.

NOUR, S.A.R; CAMARGO, E. A. A. Bamboo as an anaerobic medium: effect of filter column height. **Water Science and Technology**, Campinas, v.44, p. 63–70, 2001.

NOVAES, A. P. DE et al. **Utilização de uma fossa séptica biodigestora para melhoria do saneamento rural e desenvolvimento da agricultura orgânica**. Comunicado Técnico Embrapa, p. 1–5, 2002.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Agenda 2030**. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/>>. Acesso em 10 set. 2017.

OTTERPOHL, RU. **Black, brown, yellow, grey** - the colors of sanitation. *Water*, v. 21, 2001.

PAGANINI, W. DA S. **Disposição de esgotos no solo, através de escoamento à superfície, com utilização de gramíneas**: avaliação do processo quanto aos aspectos sanitários, operacionais, construtivos e de manutenção. 1997. 197f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

PAULO, P. L. et al. Natural systems treating greywater and blackwater on-site: Integrating treatment, reuse and landscaping. **Ecological Engineering**, Campo Grande, v. 50, p. 95–100, 2013.

PERES, L. J. S.; HUSSAR, G. J. BELI, E. Eficiência do tratamento de esgoto doméstico de comunidades rurais por meio de fossa séptica biodigestora. **Engenharia Ambiental**, Espírito Santo do Pinhal, v.7, n.1, p. 20–36, 2010.

PHILIPPI, L. S. **Eficácia dos sistemas de tratamento de esgoto doméstico e de água para consumo humano utilizando wetlands considerando períodos diferentes de instalação e diferentes substratos e plantas utilizados**. Florianópolis: Grupo de estudos em Saneamento Descentralizado do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. p. 62.

SALATI, E. Utilização de sistemas de wetlands construídas para tratamento de águas. **Biológico**, São Paulo, v. 95, p. 112- 116, 2003.

SAVEGNAGO, L.; FERRI, R. **Caracterização de esgoto oriundo de fossa séptica biodigestora e seu potencial para aplicação na agricultura como biofertilizante**. 2014. 67f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, 2014.

SCHERER, R. M. F. M. J. Sistemas alternativos para o tratamento local dos efluentes sanitários. **Série: Ciências Naturais e Tecnológicas**, Santa Maria, v. 10, n. 1, p. 53–65, 2009.

SCHERTENLEIB, R.; PANESAR, A. **Towards more sustainable sanitation solutions**. Disponível em: <<https://www.susana.org/en/>>. Acesso em: 24 set. 2017.

SEVERINO, A. J. **Metodologia do trabalho científico**. São Paulo: Cortez, 1985.

SEZERINO, P. H. et al. Experiências brasileiras com wetlands construídos aplicados ao tratamento de águas residuárias: parâmetros de projeto para sistemas horizontais. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, Florianópolis, v. 20, n. 1, p. 151–158, 2015.

SHRESTHA, R. R. **Application of constructed wetlands for wastewater treatment in Nepal**. 1999. 300f. Dissertação (Doutorado em Ciências Naturais) - University of Agricultural Sciencies, Vienna, p. 1–41, 1999.

SILVA, W. T. L. DA; FAUSTINO, A. S.; NOVAES, A. P. DE. **Eficiência do processo de biodigestão em fossa séptica biodigestora inoculada com esterco de ovino**. São Carlos : Comunicado Técnico Embrapa, n. 34, p. 20, 2007.

SPERLING, M. VON; LEMOS CHERNICHARO, C. A. DE. **Biological wastewater treatment in warm climate regions**. London: IWA Publishing, 2005, 856 p.

SURAMPALLI, R. Y. , FELLOW, P. E. Performance evaluation of overload flow wastewater treatment system under winter and summer conditions. **Journal of Cold Regions Engineering**, Kansas City, v. 40, n. 1893, p. 2014–2025, 1996.

TAEBI, A.; DROSTE, R. L. Performance of an overland flow system for advanced treatment of wastewater plant effluent. **Journal of Environmental Management**, Isfahan, v. 88, n. 4, p. 688–696, 2008.

TEIXEIRA, J. C.; HELENA, M.; GOMES, R. Associação entre cobertura por serviços de saneamento e indicadores epidemiológicos nos países da América Latina : estudo com dados secundários. **Revista Panameriacana de Salud Publica**, Juiz de Fora, v. 32, n. 6, p. 419–425, 2012.

TONETTI, A. L. et al. Evaluation of a simple system of wastewater treatment aiming at use in rural areas | Avaliação de um sistema simplificado de tratamento de esgotos visando a utilização em áreas rurais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campinas, v. 14, n. 2, p. 227–234, 2010.

TONETTI, A. L. et al. Remoção de matéria orgânica, coliformes totais e nitrificação no tratamento de esgotos domésticos por filtros de areia. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, Campinas, v. 10, n.3, p.209–218, 2005.

TONETTI, A. L. et al. Tratamento de esgoto e produção de água de reúso com o emprego de filtros de areia. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, Campinas v. 17, n. 3, p. 287–294, 2012.

TONETTI, A. L. et al. Tratamento de esgotos de pequenas comunidades pelo método do escoamento superficial no solo. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, Campinas, n. 13, p. 69–79, 2009.

TONETTI, A. L.; FILHO, B. C.; STEFANUTTI, R. Pós-tratamento de efluente de filtros anaeróbios operados com baixo tempo de detenção hidráulica por escoamento superficial no solo. Post-treatment of anaerobic filters operated with low hydraulic detention time through overland flow system. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, Campinas, v. 17, n. 1, p. 7–12, 2012.

TONETTI, A. L.; FILHO, B. C.; GUIMARÃES, J. R.; FADINI, P. S. NICOLAU, C. E. Desnitrificação em um sistema simplificado de tratamento de esgoto. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Campinas, v.18, n.4, p. 381–392, 2013.

UEHARA, M. Y. et al. **Operação e manutenção de lagoas anaeróbias e facultativas**. São Paulo: CETESB, 1989. 92 p.

UN-WATER. **Water and sanitation interlinkages across the 2030 - agenda for sustainable development**. Disponível em: <<http://www.unwater.org/publications/water-sanitation-interlinkages-across-2030-agenda-sustainable-development/>>. Acesso em: 3 jul. 2017.

VARNIER, C. **Ocupação urbana e contaminação das águas subterrâneas por nitrato**. Instituto Geológico. Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 2013. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/igeologicosp/ocupao-urbana-e-contaminacao-dasguas-subterrneas-por-nitrato>>. Acesso em: 25 nov. 2017.

VICQ, R. DE; LEITE, M. G. P. Avaliação da implantação de fossas sépticas na melhoria na qualidade de águas superficiais em comunidades rurais. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, Ouro Preto, v. 19, n. 4, p. 411–416, 2014.

WEBER, C. F.; KAICK, T. S. VAN. Dimensionamento de wetlands construídas em sistemas individuais de tratamento de esgoto sanitário. SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE WETLANDS CONSTRUÍDOS. 2., 2014, Curitiba. **Anais...** Curitiba: 2014.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Progress on drinking water, sanitation and hygiene**. Disponível em: <https://www.unicef.org/publications/index_96611.html>. Acesso em: 15 ag. 2017.

WU, S. et al. Performance of integrated household constructed wetland for domestic wastewater treatment in rural areas. **Ecological Engineering**, Beijing, v. 37, n. 6, p. 948–954, 2011.