

**INSTITUTO FEDERAL CATARINENSE CAMPUS ARAQUARI  
MESTRADO PROFISSIONAL EM TECNOLOGIA E AMBIENTE**

**USO DA ENERGIA SOLAR NO APRIMORAMENTO DA COMPOSTAGEM  
AERÓBIA: DESENVOLVIMENTO DE UMA COMPOSTEIRA GIRATÓRIA AERADA COM  
AQUECIMENTO**

**FRANKIE TIEGS**

**ARAQUARI - SC, Agosto de 2022**

**FRANKIE TIEGS**

**USO DA ENERGIA SOLAR NO APRIMORAMENTO DA COMPOSTAGEM  
AERÓBIA: DESENVOLVIMENTO DE UMA COMPOSTEIRA GIRATÓRIA AERADA COM  
AQUECIMENTO**

Dissertação de Mestrado Profissional em Tecnologia e Ambiente do CCPGTA do Instituto Federal Catarinense como requisito para a obtenção do título de Mestre em Tecnologia e Ambiente.

Orientador: Dr. Claudemir M. Radetski

Co-Orientador: Dr. Leandro M. S. Alves

Araquari, SC

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática do ICMC/USP, cedido ao IFC e  
adaptado pela CTI - Araquari e pelas bibliotecas do Campus de Araquari e Concórdia.

T559u      Tiegs, Frankie  
            Uso da energia solar na aprimoramento da  
compostagem aeróbia: desenvolvimento de uma  
composteira giratória aerada com aquecimento. /  
Frankie Tiegs; orientador Claudemir Marcos Radetski;  
coorientador Leandro Marcos Salgado Alves. --  
Araquari, 2022.  
54 p.

Dissertação (mestrado) - Instituto Federal  
Catarinense, campus Araquari, , Araquari, 2022.

Inclui referências.

1. Composteira fotovoltaica. 2. Co-compostagem. 3.  
Resíduos sólidos orgânicos. 4. Glifosato. 5.  
Sustentabilidade ambiental. I. Radetski, Claudemir  
Marcos , II. Alves, Leandro Marcos Salgado . III.  
Instituto Federal Catarinense. . IV. Título.

FRANKIE TIEGS

**USO DA ENERGIA SOLAR NO APRIMORAMENTO DA COMPOSTAGEM  
AERÓBIA: DESENVOLVIMENTO DE UMA COMPOSTEIRA GIRATÓRIA AERADA COM  
AQUECIMENTO**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Mestre em Tecnologia e Ambiente e aprovado em sua forma final pelo Curso Mestrado Profissional em Tecnologia e Ambiente do CCPGTA do Instituto Federal Catarinense.

Araquari (SC), 30 de Agosto de 2022.

---

Prof. Fabrício Moreira Sobreira, Dr., Coordenador do Curso  
Instituto Federal Catarinense

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Claudemir M. Radetski, Dr., Orientador  
Instituto Federal Catarinense

---

Prof. Cleder Alexandre Somensi, Dr., Avaliador  
Instituto Federal Catarinense

---

Prof. Renata Storch Bohm, Dra., Avaliadora  
Acquaplan Consultoria e Tecnologia Ambiental

---

Prof. Leandro Marcos Salgado Alves, Dr., Co-Orientador  
Instituto Federal Catarinense



---

*Emitido em 30/08/2022*

**DOCUMENTOS COMPROBATÓRIOS - CAMPUS ARAQUARI Nº 17/2022 - CCPGTA (11.01.02.31)**  
**(Nº do Documento: 15)**

**(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)**

*(Assinado digitalmente em 28/09/2022 17:06 )*

CLAUDEMIR MARCOS RADETSKI

ASSINANTE EXTERNO

CPF: 586.249.379-49

Para verificar a autenticidade deste documento entre em <https://sig.ifc.edu.br/documentos/> informando seu número: **15**, ano: **2022**, tipo: **DOCUMENTOS COMPROBATÓRIOS - CAMPUS ARAQUARI**, data de emissão: **28/09/2022** e o código de verificação: **37992cb74f**

## DEDICATÓRIA

Dedico esta jornada a minha amada família: minha esposa Rejane, meu filho Luís Henrique e minha filha Ana Luísa, que sempre estiveram disponíveis em me ajudar, com muitas palavras de apoio e motivação, e pacientes com minhas incertezas e aflições.

Dedico aos familiares e amigos com os quais quero agora dedicar mais tempo.

Dedico aos nossos antepassados que de alguma forma invisível nos ajudaram nesta etapa de nossas vidas, pois somos frutos de algo maior onde o todo se une para a realização de um novo elo que se unirá a outro e assim por diante.

## AGRADECIMENTOS

Neste mundo em que muitas vezes onde se cultua o singular, estes agradecimentos mostram e corroboram que a realidade é plural, que não se faz nada sozinho. Pelo menos assim é a minha realidade e das pessoas que aceitaram viver esta jornada comigo.

Agradeço a Diego Francisco Feliciano, pessoa que aceitou o desafio de construir uma máquina a partir de um projeto inédito, somente com ideias por vezes confusas para entender, que fabricou e me ajudou a tornou real algo que somente era vivo em meus pensamentos.

Agradeço ao José Roberto Merlo e José Roberto Merlo Filho, pelo conhecimento técnico, paciência e entendimento em criar e montar as ligações necessárias para fazer a parte elétrica funcionar da forma que se fazia necessário e com sugestões de melhorias nesta fase do processo.

Agradeço a Dona Marlise de Lourdes da Silva Cuerdo Arango por ceder um pouco do seu espaço físico de trabalho para instalar os equipamentos, pelo cuidado e atenção dispensada ao projeto e, como não agradecer aos muitos momentos de conversa, onde sua simplicidade e sabedoria tanto me ajudou no dia a dia dos trabalhos.

Agradeço ao Luan Noberto dos Santos que desde o início ajudou com a manutenção das máquinas e interveio nas várias vezes onde foi preciso ajustar/consertar problemas inesperados, visto que foram inúmeras contingências.

Agradeço ao Hiran Rosa Ferreira que com sua habilidade com ferramentas socorreu com ideias e soluções inovadoras que mantiveram o projeto em andamento

Agradeço a Rejane Cristina Zanelato Tiegs que compartilhou seus conhecimentos em Biologia nos vários testes e observações no local de pesquisa.

Agradeço ao Instituto Federal Catarinense - Campus de Camboriú - por disponibilizar o espaço necessário para a implantação e condução da pesquisa e pelo uso dos laboratórios para as análises da matéria orgânica e umidade, e ao Instituto Federal Catarinense - Campus de Araquari - por oferecer a possibilidade da realização do sonho do Mestrado.

Agradeço a Michela Cancillier que me auxiliou com os equipamentos do Laboratório do Instituto Federal Catarinense - Campus Camboriú, compartilhando seu tempo e conhecimento.

Agradeço ao Renan Chiprauski Testolin da UNIVALI - Universidade do Vale do Itajaí - que não mediu esforços em interpretar e explicar os resultados das análises químicas que se

apresentavam.

Agradeço a UNIVALI - Universidade do Vale do Itajaí - por disponibilizar o laboratório CLEAN (Central de Laboratórios e Ensaio Analíticos).

Agradeço ao meu Coorientador Prof. Dr. Leandro Marcos Salgado Alves e ao Prof. Dr. Cleder Alexandre Somensi do Instituto Federal Catarinense - Campus Araquari pelo apoio dispensado e sempre disponíveis quando solicitados.

E um grande e afetuoso agradecimento ao meu mentor, sempre disposto a ajustar a rota, pronto e atuante em orientar, corrigir e fomentar a pesquisa, disposto a caminhar ao meu lado mostrando a linha que deveria ser seguida para alcançar o sucesso, meu Orientador Prof. Dr. Claudemir Marcos Radetski.

“Quem estará nas trincheiras ao teu lado?

- E isso importa?

- Mais do que a própria guerra”.

(Ernest Hemingway)

## RESUMO

**Tiegs, Frankie.** Uso da Energia Solar no Aprimoramento da Compostagem Aeróbia: Desenvolvimento de uma Composteira Giratória Aerada com Aquecimento. **2022. 54f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Curso de Mestrado Profissional em Tecnologia e Ambiente, Pró-Reitoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação, Instituto Federal Catarinense, Araquari (SC), 2022.**

O presente projeto visa desenvolver um sistema de compostagem que usa energia solar para misturar e aquecer a matéria orgânica a ser degradada. A eficiência deste novo sistema foi avaliada pela comparação de parâmetros físico-químicos analisados na compostagem clássica submetida à temperatura ambiental e com mistura manual e na compostagem melhorada, onde se fez uso da composteira giratória e aquecida pela energia solar. Assim, este projeto inovador buscou realizar um processo de compostagem mais eficiente com ganho de tempo, produtividade e qualidade do composto. Depois da composteira ter sido desenvolvida, fez-se o registro da temperatura, odor e alguns parâmetros físico-químicos (i.e., pH, demanda química e bioquímica de oxigênio - DQO e DBO) e microbiológicos (atividade das enzimas pelo método da hidrólise do diacetato de fluoresceína (FDA) na compostagem clássica e na compostagem melhorada. Também foi testada a taxa de biodegradação do pesticida Glifosato nos sistemas clássico e melhorado de compostagem. Os resultados mostraram que a compostagem com auxílio da energia solar apresentou maior eficiência na redução dos valores dos parâmetros físicos-químicos básicos em relação a compostagem tradicional para os primeiros 15 dias, sendo que durante este período, o valor da demanda química de oxigênio foi menor em 22,9% na composteira fotovoltaica, enquanto para a demanda bioquímica de oxigênio obteve-se uma redução no valor de 38,6%. Os outros valores verificados no composto presente no sistema fotovoltaico foram menores do que os encontrados no composto gerado na compostagem clássica, indicando uma compostagem mais rápida. Em um processo de co-compostagem, o pesticida Glifosato não interferiu na microbiologia da compostagem e foi degradado muito mais rapidamente no sistema de compostagem fotovoltaico. Este trabalho pode servir de ponto de partida para o aprimoramento desta tecnologia de biodegradação auto-sustentável, a qual pode gerar um composto de interesse comercial, satisfazendo os princípios da economia circular.

**Palavras-chave:** Composteira fotovoltaica; Co-compostagem; Resíduos sólidos orgânicos; Glifosato; Sustentabilidade ambiental

## ABSTRACT

The present project aims to develop a system that uses solar energy to mix and heat the organic matter subjected to a degradation process. The efficiency of this new system was evaluated by comparing the physical-chemical parameters analysed in normal composting (with manual mixing) and in improved composting (with the solar-based mixing and heating system). Thus, the recording of temperature and some chemical parameters, such as pH, COD, odor and microbiological activity of enzymes by the FDA method was carried out periodically. This innovative project seeks to accomplish a more efficient composting process with gain in time, productivity and quality of the compost. The results showed that composting with the aid of solar energy showed greater efficiency in reducing the values of basic physical-chemical parameters compared to traditional composting for the first 15 days, and during this period, the value of chemical oxygen demand was lowered by 22.9% in the photovoltaic composter, while for the biochemical oxygen demand a reduction of 38.6% was obtained. The other values verified in the compost of the photovoltaic compost were smaller than the values found in the compost generated in the classic composting, indicating a more fast degradation. In a co-composting process, the pesticide Glyphosate did not interfere with the microbiology of the compost and was degraded much faster in the photovoltaic composting system. This work can serve as a starting point for the improvement of this self-sustainable biodegradation technology from the energy point of view, which can generate a compound of commercial interest, satisfying the principles of the circular economy.

**Keywords:** Photovoltaic composter; Co-composting; Organic solid waste; Glyphosate; Environmental sustainability

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa do total diário de irradiação global horizontal média anual. Fonte: PEREIRA et al (2017). .....	30
Figura 2 – Composteiras giratórias e aquecidas tendo como fonte energética um sistema fotovoltaico.	32
Figura 3 – Desenho esquemático do sistema de compostagem fotovoltaico. Fonte: Elaborada pelo autor (2022). .....	34
Figura 4 – Estrutura molecular do Glifosato [N-(fosfonometil)-glicina].....	35
Figura 5 - Evolução da temperatura (°C) durante a compostagem clássica e fotovoltaica. ....	39
Figura 6 - Evolução do potencial hidrogeniônico (pH) durante a compostagem em compostagem clássica e fotovoltaica. Medido em 50 g.L <sup>-1</sup> de solução de composto (a.u.= unidade arbitrária). ....	40
Figura 7 - Evolução da demanda química de oxigênio (DQO) e demanda bioquímica de oxigênio durante a compostagem clássica e fotovoltaica. Medido em 50 g.L <sup>-1</sup> de solução de compostagem (mg.L <sup>-1</sup> ): [1] DQO Clássica; [2] DQO Foto; [3] DBO Clássica; [4] DBO Foto. ....	41
Figura 8 - Evolução da razão carbono/nitrogênio (C/N) durante a compostagem em compostagem clássica e fotovoltaica.....	42
Figura 9 - Comparação da absorbância da formação de fluoresceína por microrganismos presentes nos sistemas de compostagem clássico e fotovoltaico. ....	43
Figura 10 - Comparação da absorbância do tempo da hidrólise do diacetato de fluoresceína por microrganismos presentes nos sistemas de co-compostagem clássico e rotativo e aquecido contaminados com glifosato. ....	45

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Esquema experimental com as denominações dadas a cada composteira. ....	36
--	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros físico-químicos básicos do composto ao longo da evolução do processo biodegradativo nos controles.....	38
Tabela 2 - Concentrações do Glifosato ao longo da evolução dos processos de biodegradação.....	44
Tabela 3 - Composição relativa dos gases emitidos pelos sistemas biodegradáveis de composteira clássica e fotovoltaica.....	46

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANOVA – Análise de variância

DBO - Demanda bioquímica de oxigênio

DQO - Demanda química de oxigênio

FDA - Diacetato de fluoresceína

IAR - Agência Internacional de Pesquisa sobre o Câncer

IFC - Instituto Federal Catarinense

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

Kwh - Kilowatts hora

pH - Potencial hidrogeniônico

RSU - Resíduos sólidos urbanos

## SUMÁRIO

RESUMO .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
ABSTRACT .....	10
LISTA DE FIGURAS .....	11
LISTA DE QUADROS.....	12
LISTA DE TABELAS .....	13
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	14
SUMÁRIO .....	15
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....	16
CAPÍTULO 2 – HIPÓTESE E OBJETIVOS.....	20
CAPÍTULO 3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
CAPÍTULO 4 – MATERIAS E MÉTODOS .....	32
4.1. Desenvolvimento da composteira giratória com aquecimento à base de energia solar .....	32
4.2. Experiências de co-compostagem .....	34
4.3. Detecção de produtos de degradação do glifosato.....	37
4.4. Análise estatística .....	37
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	38
5.1. Desenvolvimento da composteira giratória com aquecimento à base de energia solar .....	38
5.2. Evolução dos parâmetros na co-compostagem .....	38
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES .....	47
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	49

## CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Toda matéria orgânica que é formada neste planeta acaba sendo degradada, seja pela degradação química, seja pela degradação bioquímica. Os seres vivos se servem de matéria orgânica de muitas formas e nesses processamentos da matéria orgânica são gerados resíduos (através dos restos de alimentos ou como subprodutos da metabolização dos alimentos). No caso da espécie humana, a população passou de uma vida nômade para uma vida fixa em um território geográfico e assim houve um aumento gradativo de resíduos neste território. Estes resíduos orgânicos a princípio foram sendo transformados pela própria natureza com seus ciclos naturais, que são processos que ocorrem no campo, na floresta ou mesmo na cidade. Estes processos de decomposição da matéria orgânica são descritos nos ciclos biogeoquímicos (ADUAN et al., 2004).

Com o aumento constante da população e forte industrialização começou-se a gerar grandes volumes de resíduos, de variadas composições. A presença de grandes concentrações de resíduos perturba significativamente o funcionamento dos ecossistemas existentes em nosso planeta, podendo mesmo prejudicar a sobrevivência de várias espécies e afetando a saúde de muitas outras. Este cenário de descarte de grandes quantidades de materiais, substâncias, objetos ou bens descartados resultante das atividades humana é planetário, pois podemos encontrar em todos os lugares problemas na gestão adequado dos resíduos sólidos. No Brasil e em várias partes do mundo subdesenvolvido se proliferaram os lixões a céu aberto, sem controle nenhum, os quais nada mais são do que um depósito de tudo que não se queira perto do núcleo urbano.

A degradação ambiental é uma realidade e a proteção do meio ambiente necessitou de uma formalização legal. Em 1988 com a Lei Federal 6.938 se estabelece a Política Nacional do Meio Ambiente e na Constituição de 1988 no artigo 225 está estabelecido que: “Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao poder público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações.”

Um crescente envolvimento de toda sociedade culminou com a Lei 12.305/2010 denominada a lei da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA,

2010). O artigo 3º do inciso VII nos dá o entendimento da destinação final ambientalmente adequada dos resíduos: destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes, entre elas a disposição final, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos. No mesmo artigo no inciso IX entende-se por geradores de resíduos sólidos as pessoas físicas ou jurídicas, de direito público ou privado, que geram resíduos sólidos por meio de suas atividades, nelas incluído o consumo. Seguindo no artigo temos a definição de resíduo sólido (inciso XV): rejeitos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada.

Nas disposições preliminares, o Artigo 9º nos diz que “Na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.” E no inciso I salienta-se que poderão ser utilizadas tecnologias visando à recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos, desde que tenha sido comprovada sua viabilidade técnica e ambiental e com a implantação de programa de monitoramento de emissão de gases tóxicos aprovado pelo órgão ambiental.

Como se percebe, o ambiente jurídico brasileiro é suficientemente disciplinado, ou seja, não falta ordenamento jurídico para que o Brasil seja um exemplo a ser seguido. Mas a realidade não segue as escritas tão bem determinadas no papel. Assim, conforme dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE, o Brasil produz hoje 79 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU) por ano, sendo 19% a mais do que produzia em 2010 (ABRELPE, 2020). A previsão da ABRELPE é que em 2050 nossa produção de RSU aumente em 50%. Os gastos com limpeza urbana e coleta de RSU cresceram em uma década 25%, passando de R\$ 8,00 em 2010 para R\$ 10,00 em 2019 por habitante/mês e os empregos também cresceram, passando de 284 mil em 2010 para 332 mil em 2019, um incremento de 17% em uma década (ABRELPE, 2020).

Neste universo dos RSU, os orgânicos representam 45,3%, sendo que 35% deste total é

resíduo reciclável seco, principalmente plástico, papel e papelão, além de vidros e metais, 14,1% são rejeitos e 5,6% considerados outros (ABRELPE, 2020). Neste contexto, o interessante é notar que somente 19,7% deste total poderiam ser encaminhados para os aterros sanitários por serem rejeitos, não tendo mais possibilidade de transformação e/ou reutilização.

Quase metade dos RSU poderia ser destinados à degradação bioquímica, a qual pode gerar energia ou mesmo, novos compostos com aplicações variadas, sendo a principal destas aplicações o uso dos compostos tratados como condicionante e/ou fertilizante de solos degradados. Para chegar a este produto existem dois modos de biodegradação: a aeróbia e a anaeróbia, sendo que cada uma delas apresenta vantagens e desvantagens (INSAM & BERTOLDI, 2007). Alguns conjuntos de biodegradação usam os dois modos sequencialmente e outros, intercalam os dois sistemas durante a biodegradação. Existe uma farta literatura sobre a degradação bioquímica, inclusive para o caso do método da compostagem, o qual está se tornando um processo caseiro. Muitas cidades estão criando áreas públicas para fazer a compostagem coletiva, onde os habitantes depositam e voluntariamente, operam as composteiras públicas. Contudo, muitos lares estão adotando seus próprios sistemas de compostagem, gerando o produto húmico denominado composto ou terra de jardinagem.

Apesar da compostagem ser um processo simples, eficiente e de baixo custo, este método apresenta o inconveniente de ser relativamente demorado. É nesse aspecto do tempo de compostagem que se insere o objetivo do presente trabalho, onde buscou-se realizar um processo de compostagem mais eficiente com ganho de tempo, produtividade e qualidade do composto. Para tanto, desenvolveu-se um sistema de compostagem que usa energia solar para misturar e aquecer a matéria orgânica a ser degradada. A eficiência deste novo sistema foi avaliada pela comparação de parâmetros físico-químicos analisados na compostagem clássica submetida à temperatura ambiental e com mistura manual e na compostagem melhorada, onde se fez uso da composteira giratória e aquecida pela energia solar.

Além de avaliar a eficiência das compostagens de resíduos orgânicos domésticos, optou-se por contaminar amostras destes resíduos com o Glifosato e em seguida, submeter os resíduos contaminados aos 2 processos testados: o da compostagem natural e o da compostagem no tambor giratório aquecido. Os resultados poderão nos indicar a conveniência ou não de se usar a co-compostagem no tambor giratório aquecido como um método de

tratamento de resíduos perigosos. O Glifosato é o herbicida mais utilizado no Brasil e no mundo (LIMA et al., 2021) e pertence à classe dos compostos organofosforados, especificamente um fosfonato.

## **CAPÍTULO 2 – HIPÓTESE E OBJETIVOS**

### **HIPÓTESE**

A compostagem pode ser acelerada caso haja uma aeração constante no processo, o qual também será favorecido por um aquecimento que promova a reprodução dos organismos degradadores.

### **OBJETIVOS**

#### **.Objetivo geral**

Desenvolver um sistema de compostagem fotovoltaico com mistura e aquecimento, comparando a eficiência de degradação deste sistema com o sistema normal de compostagem de resíduos sólidos orgânicos.

#### **Objetivos específicos**

- Desenvolver um sistema de mistura giratória e aquecimento de resíduos orgânicos tendo a energia solar como fonte energética;
- Comparar a evolução da degradação através da análise da temperatura e alguns parâmetros químicos como pH, DQO e DBO nos dois sistemas de compostagem, clássica e fotovoltaica;
- Comparar a evolução microbiológica no composto (atividade das enzimas pelo método da hidrólise do diacetato de fluoresceína - FDA) nos dois sistemas de compostagem, clássica e fotovoltaica;
- Comparar a biodegradação do herbicida Glifosato nos dois sistemas de compostagem, clássica e fotovoltaica;
- Avaliar a viabilidade técnica do sistema desenvolvido.

### **CAPÍTULO 3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A compostagem é o processo de oxidação da matéria orgânica por diferentes micros, meso e macro-organismos, levando à formação de compostos estabilizados do ponto de vista físico-químico, os quais recebem a denominação genérica de húmus. Este processo de tratamento dos resíduos já foi citado na Mesopotâmia, na China, na Grécia e no Império Romano (PIRES, 2011). Em termos técnicos, a decomposição da matéria orgânica é o processo central dos ciclos biogeoquímicos que possibilitam a existência da vida neste planeta (ADUAN et al., 2004). Conforme citado por Costa et al. (2015), a compostagem propriamente dita corresponde à oxidação da fração orgânica selecionada, devido ao ataque de diversos microrganismos sob condições aeróbicas, o que necessita de revolvimento periódico do material a ser degradado, ou alternativamente, que haja aeração forçada no interior da biomassa que está sendo oxidada.

A primeira fase da compostagem, dita bioestabilização, envolve um aumento da temperatura, aumento nas reações de decomposição, ocorrendo a liberação de calor, CO<sub>2</sub> e vapor de água (também chamada de fase termofílica). A segunda fase em que a temperatura volta a se equilibrar com a temperatura ambiente, os organismos atingem um equilíbrio dinâmico e há sínteses de substâncias húmicas pelos macro-organismos presentes na biomassa. Por fim, pode haver um refinamento do aspecto do composto corresponde à fase de pós-processamento mecânico com a finalidade de melhorar as características granulométricas do composto e remover contaminantes inertes que não foram removidos na primeira etapa (CERRI, 2008; CORDEIRO, 2010; COSTA et al., 2015).

Em termos de gerenciamento dos RSU, a compostagem tem sido um dos componentes centrais da questão da sustentabilidade, pois este princípio ecológico é baseado justamente no ciclo de vida dos produtos que têm a decomposição como fase terminal, podendo utilizar como material de partida resíduos orgânicos domésticos, industriais, agrícolas e florestais (CERRI, 2008). Mais especificamente, a compostagem se dá através de processos físicos, químicos e biológicos, efetuados em duas fases distintas: a bioestabilização ou semimaturação (quando ocorrem as reações bioquímicas mais intensas, predominantemente termofílicas, e se eliminam as bactérias patogênicas) e a maturação, que é quando ocorre a humificação

(GOUVEIA, 2012; COSTA et al., 2015). O tempo de compostagem vai depender de vários fatores que estão associados ou não à tecnologia usada, mas a principal influência na taxa de degradação é a qualidade química do resíduo a ser compostado. Assim, o tempo de compostagem pode variar de 25 a 35 dias para a bioestabilização e de 30 a 60 dias para a maturação (CAMPOS & BLUNDI, 1998).

Na bioestabilização, a atividade microbiana é dominada por bactérias, fungos e actinomicetos (decompositores primários), as quais consomem as frações orgânicas. Depois, estes organismos vão servir de alimentos aos decompositores secundários e terciários (protozoários, helmintos, artrópodes, entre outros) (GOLUEKE, 1992). Dependendo da temperatura ótima de crescimento, os microrganismos envolvidos na degradação da matéria orgânica são agrupados em duas categorias distintas: mesófilos (25-40°C) e termófilos (45-60°C). Seguindo a atividade de uma flora mesofílica, atinge-se uma temperatura elevada, cerca de 40°C. Uma temperatura de quase 50°C produz um efeito inibitório para espécies mesofílicas enquanto os termófilos se desenvolvem gradualmente. A 65°C, o crescimento da flora termofílica torna-se máximo. Essa atividade microbiana pode até causar temperaturas máximas de 75 a 80°C. Estas temperaturas inibem parcialmente a flora termofílica. Então a temperatura cai gradualmente e o ambiente torna-se propício ao desenvolvimento dos organismos mesofílicos (PELCZAR et al., 1977; COUTURE, 1988; FOGARTY & TUOVINEN, 1991).

Durante todo o processo de compostagem, as bactérias que estão presentes na pilha de resíduos desde o início crescem muito rapidamente e representam o grupo de microrganismos mais importante em número para a biodegradação, quando o sistema atinge a temperatura máxima (HAUG, 1993). Desde o início, elas consomem produtos de fácil digestão: carboidratos, lipídios e carboidratos de cadeia curta (COUTURE, 1988). A presença de fungos nas camadas externas da pilha de compostagem é contínua. A temperatura e a umidade são mais baixas nestas camadas do que aquelas que caracterizam as camadas centrais, onde a temperatura pode chegar a 80°C.

A temperatura máxima tolerada pelos fungos termofílicos é em torno de 50°C. Esses microrganismos desempenham um papel importante durante a compostagem ao quebrar ácidos orgânicos, celulose, hemiceluloses e, em pequena medida, lignina (COUTURE, 1988). Durante os estágios finais da compostagem, os actinomicetos, por sua vez, dominam e

consomem as substâncias mais recalcitrantes, como celulose e lignina (COUTURE, 1988). Mais detalhadamente, o processo de compostagem tem 4 fases distintas:

1. **Fase de Latência:** Após um curto período necessário para a colonização dos materiais a serem decompostos pelos microrganismos, ou seja, aproximadamente um dia, a temperatura da pilha de composto aumenta ligeiramente. Essa elevação se deve à atividade respiratória dos microrganismos presentes na pilha de matéria orgânica.
2. **Fase Mesofílica ou de Crescimento:** A temperatura sobe gradualmente até 45°C, como resultado da atividade e crescimento de microrganismos mesófilos aeróbicos.
3. **Fase Termofílica:** À medida que a temperatura aumenta, os microrganismos termofílicos e termotolerantes substituem os microrganismos mesófilos. A temperatura atinge 60 a 70°C. A transição mesofílica - termofílica ocorre gradualmente. Em altas temperaturas, reações químicas de natureza exotérmica podem ocorrer e, em seguida, mantém-se uma temperatura elevada.
4. **Fase de Resfriamento ou Declínio:** Entre 70 a 75°C, apenas as enzimas secretadas nas fases anteriores ainda participam da degradação. A elevação de temperatura, atingida durante as quatro fases, teoricamente deveria matar os microrganismos patogênicos presentes na pilha de matéria orgânica. O processo de compostagem deixa de ser eficiente quando as inversões das leiras (ou seja, pilhas) já não provocam um aumento da temperatura. Este fato se explica porque a maior parte da matéria orgânica já foi decomposta, o que se percebe pelo resfriamento da biomassa. A atividade microbiana é então desacelerada e as temperaturas caem para níveis mesofílicos (PEDERSEN, 1983; COUTURE, 1988).

Para o presente trabalho, é de interesse conhecer mais em detalhes quais são os fatores físico-químicos que influenciam na eficiência da compostagem. Para isto, tomaremos como base o texto publicado por Costa et al. (2015) no qual estão descritos 6 fatores influenciadores na eficiência da compostagem:

- **Aeração:** o arejamento da massa de compostagem é fundamental para uma boa eficiência do processo, pois os microrganismos aeróbicos precisam de oxigênio para

efetuar seu metabolismo. Com abundância de ar a decomposição é mais rápida, controlada, evitando o excesso de temperatura e umidade, e o mau cheiro. As pilhas do composto podem ser arejadas por revolvimentos manuais ou mecânicos, fazendo com que camadas mais externas passem a ocupar a parte interna. O fornecimento de oxigênio também pode ser feito por insuflação de ar (KIEHL, 1985).

- **Temperatura:** altas temperaturas são necessárias para a compostagem. No entanto, precisa ser mantida uma temperatura ótima de desenvolvimento para os microrganismos, pois uma variação para mais ou para menos provoca uma redução da população e da atividade metabólica (RUSSO, 2003). Kiehl (1985) considera uma faixa ótima para a compostagem de 50 a 70°C sendo 60°C a mais indicada. Temperaturas acima de 70 são consideradas desnecessárias e até desaconselháveis por longos períodos, pois limita o número de microrganismos que conseguem viver nela. Até certo valor, a temperatura influencia a velocidade de degradação da matéria orgânica, após esse limiar é prejudicial porque os elimina. O excesso de temperatura também pode impedir a ação de enzimas, retardando a atividade dos microrganismos e, conseqüentemente, o processo de compostagem (RUSSO, 2003).
- **Umidade:** por ser a compostagem um processo biológico de degradação da matéria orgânica, a presença de água é fundamental para as necessidades fisiológicas dos microrganismos. Teoricamente, o teor de umidade deveria ser de 100%, no entanto, o valor é variável ao longo do processo devido a vários parâmetros, como: tipo de matéria orgânica, tamanho das partículas, configuração geométrica da leira de compostagem, peso específico da massa de compostagem, sistema e forma de aeração, entre outros (PEREIRA NETO & LELIS, 1999; RUSSO, 2003). Segundo estudo desenvolvido por Pereira Neto e Lelis (1999), no início do processo o teor ideal é de 60%, se for abaixo de 30% é prejudicial, pois inibe a atividade microbiológica e durante o processo a umidade não pode obter valores abaixo 40%. Elevados teores de umidade promovem a ocupação do espaço vazio com água, restringindo a ocupação do ar e a difusão do oxigênio.
- **Relação Carbono/Nitrogênio:** a relação apropriada de carbono e nitrogênio (C/N) contribui para o crescimento e atividade das colônias de microrganismos envolvidos no processo de degradação da matéria orgânica, possibilitando a produção do composto

em menos tempo (CERRI, 2008). Segundo Russo (2003), o carbono tem três funções fisiológicas principais: a) é constituinte do material celular; b) funciona como elétron doador em metabolismos energéticos (respiração de substratos orgânicos e fermentação); c) funciona como elétron receptor em reações metabólicas de energia (fermentação, redução do CO<sub>2</sub> em CH<sub>4</sub>). Quanto ao nitrogênio, suas funções são: a) é constituinte de proteínas, ácido nucleico, coenzimas e aminoácidos; b) funciona como elétron doador em reações metabólicas de energia de certas bactérias; c) na forma de nitrito e de nitrato atua como elétron receptor em reações metabólicas de energia da bactéria da desnitrificação sob condições anaeróbias. Segundo Kiehl (1985), os microrganismos absorvem o carbono e o nitrogênio numa proporção de 30 partes do primeiro para uma parte do segundo, sendo, portanto está a proporção ideal nos resíduos. No entanto, consideram-se os limites de 26/1 a 35/1 como sendo as relações C/N mais recomendadas para uma rápida e eficiente compostagem. Se os resíduos utilizados para a compostagem apresentarem baixa relação C/N, perdem nitrogênio na forma amoniacal, prejudicando a qualidade do composto. Nesse caso, recomenda-se juntar restos vegetais celulósicos, como resíduos de podas e jardinagem, para elevá-la a um valor próximo do ideal. Se a matéria prima possui relação C/N alta, o processo torna-se lento e o produto final apresentará baixos teores de matéria orgânica. Para corrigir basta acrescentar materiais ricos em nitrogênio tais como esterco, camas animais, tortas vegetais, entre outros (RUSSO, 2003; CORDEIRO, 2010).

- **Potencial hidrogeniônico:** o processo de compostagem é relativamente pouco sensível aos valores de pH, pois a matéria orgânica com pH variável entre 3 e 11 pode ser compostada. No entanto, valores próximos a neutralidade são considerados ideais (5.5 a 8) porque é onde os microrganismos melhor se adaptam. No início do processo, o pH atinge valores baixos, próximos a 5, próprio da ação das bactérias e ao longo do processo, com a estabilização do composto, vai atingindo valores entre 7 e 8 unidades (CERRI, 2008).
- **Granulometria do material:** Kiehl (1985) considera a dimensão das partículas como sendo uma das características fundamentais para o bom andamento da compostagem, pois o tamanho delas irá definir a superfície de exposição para o ataque dos

microrganismos. Quanto maior a superfície de exposição, menor a partícula da matéria orgânica e mais rápida será sua decomposição. No entanto, granulometrias demasiadas finas, < 2 mm, dificultam a aeração por facilitar a compactação, enquanto números acima de 16 mm facilitam o arejamento natural (RUSSO, 2003). Então, deve-se encontrar um valor que considere a aeração e a superfície de exposição. Segundo Cordeiro (2010), as dimensões das partículas utilizadas na compostagem não podem ultrapassar 3 cm de diâmetro.

Assim, a compostagem é um processo ecologicamente correto para a reciclagem de resíduos orgânicos, pois os mesmos podem ser transformados em energia e/ou novos produtos com aplicações diversas. A grande vantagem do sistema de compostagem é seu custo inferior em termos de infraestrutura e mão de obra, apresentando grande eficiência na reciclagem de nutrientes que podem ser dispostos em solos degradados (enriquecimento solo por macro e micronutrientes advindos do processo de biodegradação), tornando susceptíveis de serem colonizados por microrganismos que iniciam a colonização microbiológica que proporcionará o aparecimento de toda uma ecologia evolutiva com o passar do tempo (HAUG, 1993; ADANI et al., 1995; KIEHL, 1998; MANIADAKIS et al., 2004).

Por definição, composto é uma matéria orgânica estabilizada e livre de patógenos originada de um processo controlado de decomposição microbiana através da oxigenação de uma massa heterogênea de matéria orgânica no estado sólido. É um excelente fertilizante devido à presença de sais minerais e húmus (KIEHL, 1998). A compostagem de subprodutos dos RSU segue os conceitos de um ciclo de economia circular, como por exemplo, o composto é utilizado para fertilizar o solo com vista à produção de pastagens, consumida pelo gado, e após o abate, gera carne para consumo humano e resíduos reaproveitados em produção de compostagem (MANIADAKIS et al., 2004; FAO, 2015). Além dos aspectos econômicos diretos, a melhoria do teor de carbono do solo usando a aplicação de composto também diminuirá a taxa de erosão do solo e aumentará o sequestro de carbono para mitigar as mudanças climáticas (HAO et al., 2004; CHIU et al., 2016; WARE & POWER, 2016). Uma das maiores vantagens do uso do composto para a entrada de matéria orgânica é que ele contém nutrientes de liberação lenta, benéficos para a nutrição das plantas (FAO, 2015; FARHAD et al., 2018).

Atualmente, diferentes técnicas de compostagem são utilizadas, como leira estática

com aeração natural, leira estática com aeração forçada, leira com agitação mecânica, compostagem em reator (confinado) e leira estática com aeração passiva (método UFSC). (HAUG, 1993; INÁCIO & MILLER, 2009; FAO, 2015). No entanto, a eficiência de qualquer processo de compostagem é muito dependente da microbiologia presente neste processo (LIM et al., 2015). A compreensão dos processos microbianos é importante para o conhecimento da ciclagem de nutrientes e dinâmica da matéria orgânica (SMITH & PAUL, 1998), sendo a temperatura o parâmetro mais comum para avaliar a evolução da compostagem, uma vez que este parâmetro expressa a atividade dos microrganismos no processo de biodegradação. (HAUG, 1993; INÁCIO & MILLER, 2009; FAO, 2015; VALENTE et al., 2009; ZHANG et al., 2009).

Normalmente, os resíduos orgânicos utilizados na compostagem fornecem muitos dos microrganismos necessários à sua decomposição; entretanto, o uso de inóculos serve para promover uma colonização mais rápida da massa em decomposição, o que leva a uma elevação mais rápida da temperatura interna da biomassa e, conseqüentemente, a uma fase inicial bem-sucedida do processo (HAUG, 1993; INÁCIO & MILLER, 2009; FAO, 2015). No entanto, existem poucos estudos sobre melhorias que poderiam ser implementadas no processo de compostagem de resíduos orgânicos (SÁNCHEZ et al., 2017). Alguns estudos procuram melhorar a compostagem pela inclusão de inóculos contendo microrganismos mais específicos para degradar certas famílias de compostos químicos, mas estas melhorias têm custo considerável, pois envolvem pesquisas para seleção, cultivo e adaptação em meios de cultivo que podem ser um fator econômico limitante à popularização destas melhorias (INSAM & BERTOLDI, 1998; ZENG et al., 2011; KI et al., 2017).

Para superar as limitações da compostagem convencional, investigações têm sugerido que a compostagem seja feita com composteiras giratórias, sendo que um sistema com um tambor giratório é facilmente montado no local escolhido ou na origem dos resíduos biodegradáveis (SHARMA et al. 2018). Inúmeras pesquisas foram realizadas sobre o uso de compostagem em tambores giratórios para gerenciar resíduos orgânicos, como resíduos de flores (SHARMA et al. 2018), resíduos sólidos urbanos (GIKAS et al. 2018) e lodo de fábrica de papel (HAZARIKA & KHWAIRAKPAM, 2018).

Contudo nenhum destes sistemas com tambores giratórios usou energia solar para fazer com que o sistema de compostagem fosse viável do ponto de vista econômico. Um dos

raros trabalhos que associou o tambor giratório com uma fonte de energia fotovoltaica foi publicado por Siti et al. (2021). Estes autores descrevem a concepção e apresentam o projeto (incluindo a parte mecânica e fotovoltaica) de uma nova composteira movida por energia solar destinada principalmente para uso residencial, permitindo transformar in situ RSU em um composto de boa qualidade que serve como condicionador de solo e tudo isso, em pouco tempo (i.e., 4 semanas) comparado a outros sistemas de compostagem.

Uma melhoria na eficiência do processo de compostagem poderia fazer com que este processo de biodegradação fosse usado como método complementar de tratamento de resíduos sólidos contaminados por compostos orgânicos. Atualmente o principal destino dos lodos contaminados com compostos orgânicos é o uso agrícola. Portanto, seria mais prudente tratar esses lodos antes de aplicá-los no solo, tentando degradar ao máximo os contaminantes presentes nos mesmos e destruir as bactérias presentes nesses lodos. Obviamente que para estes casos, inicialmente deve ser avaliado o impacto da presença dos contaminantes no processo de co-compostagem. No lodo, o poder inibidor do crescimento bacteriano pelos contaminantes terá como contrapeso o excesso de nutrientes que promovem o crescimento bacteriano, sendo que um dos efeitos será prevalente na co-compostagem que ocorrerá quando os lodos contaminados forem misturados com os resíduos a serem compostados.

Assim, parece que a co-compostagem pode ser uma forma interessante de degradar contaminantes residuais presentes em amostras ambientais, como já foi verificado no caso de antibióticos (GAUTHIER et al., 2010; YANG et al., 2020), corantes têxteis recalcitrantes (TESTOLIN et al., 2021), hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (NAS et al., 2020) e resíduos orgânicos (AHMAD et al., 2007).

No presente estudo, utilizou-se o Glifosato como molécula-modelo para testar a eficiência da co-compostagem. O Glifosato é um herbicida usado para destruir o que é comumente chamado de ervas daninhas, ou plantas que crescem em um local onde não foram estabelecidas. O glifosato atua bloqueando a cadeia de síntese de precursores de aminoácidos essenciais para o funcionamento da planta, em especial para a fotossíntese. Assim, este herbicida tem a propriedade de ter um amplo emprego, pois age em um mecanismo bioquímico necessário para todas as espécies de plantas e tem uma atuação sistêmica (i.e., pode deslocar-se por todo o sistema vegetal, dos tecidos às raízes).

Produzido inicialmente apenas pela Monsanto, sob o nome comercial de Roundup, desde 2000 caiu em domínio público. Agora ele é fabricado e comercializado por muitas empresas. Em 2015, a Agência Internacional de Pesquisa sobre o Câncer (IARC), vinculada à Organização Mundial da Saúde, publicou um relatório concluindo que o glifosato deve ser classificado como provável carcinógeno para humanos (classificação 2A do IARC). Em particular, a agência acredita que há evidências mostrando uma associação entre a exposição ao glifosato e o desenvolvimento de cânceres como o linfoma não-Hodgkin e o câncer de pulmão (IARC, 2015). O uso generalizado e o debate público sobre esses usos e possíveis efeitos sobre a saúde pública e sobre os ecossistemas despertaram a preocupação da sociedade e uma controvérsia científica sobre a toxicidade do glifosato (BLAYLOCK, 2015; FARIA, 2015).

A aceleração do processo de compostagem através do revolvimento contínuo e aquecimento por meio da energia capturada pelas placas solares, principalmente na fase inicial da compostagem, proporcionará um maior poder de degradação/desinfecção do processo de biodegradação. Isto pode trazer ganho de tempo, ganho de produtividade, melhoria do composto e redução drástica de área física utilizada na compostagem. A energia solar no Brasil possui pequena variabilidade anual e sua distribuição pode ser considerada uniforme, além de possuir um dos maiores índices de irradiação solar da Terra. Atualmente a energia fotovoltaica tem apresentado uma grande evolução desde o início de sua história e é a tecnologia de geração de energia de mais rápido crescimento em todo o mundo (REN21, 2022).

A irradiação solar global horizontal no Brasil apresenta médias diárias nas 5 regiões como sendo: Norte: 5,5 kWh/m<sup>2</sup>, Nordeste: 5,7 kWh/m<sup>2</sup>, Centro Oeste: 5,6 kWh/m<sup>2</sup>, Sudeste: 5,5 kWh/m<sup>2</sup> e Sul 5,0 kWh/m<sup>2</sup>. O índice médio anual de irradiação solar no país é maior na região Nordeste, com destaque para o Vale do São Francisco e menor na região Sul. A Figura 1 apresenta os valores de irradiação solar global horizontal no território brasileiro.

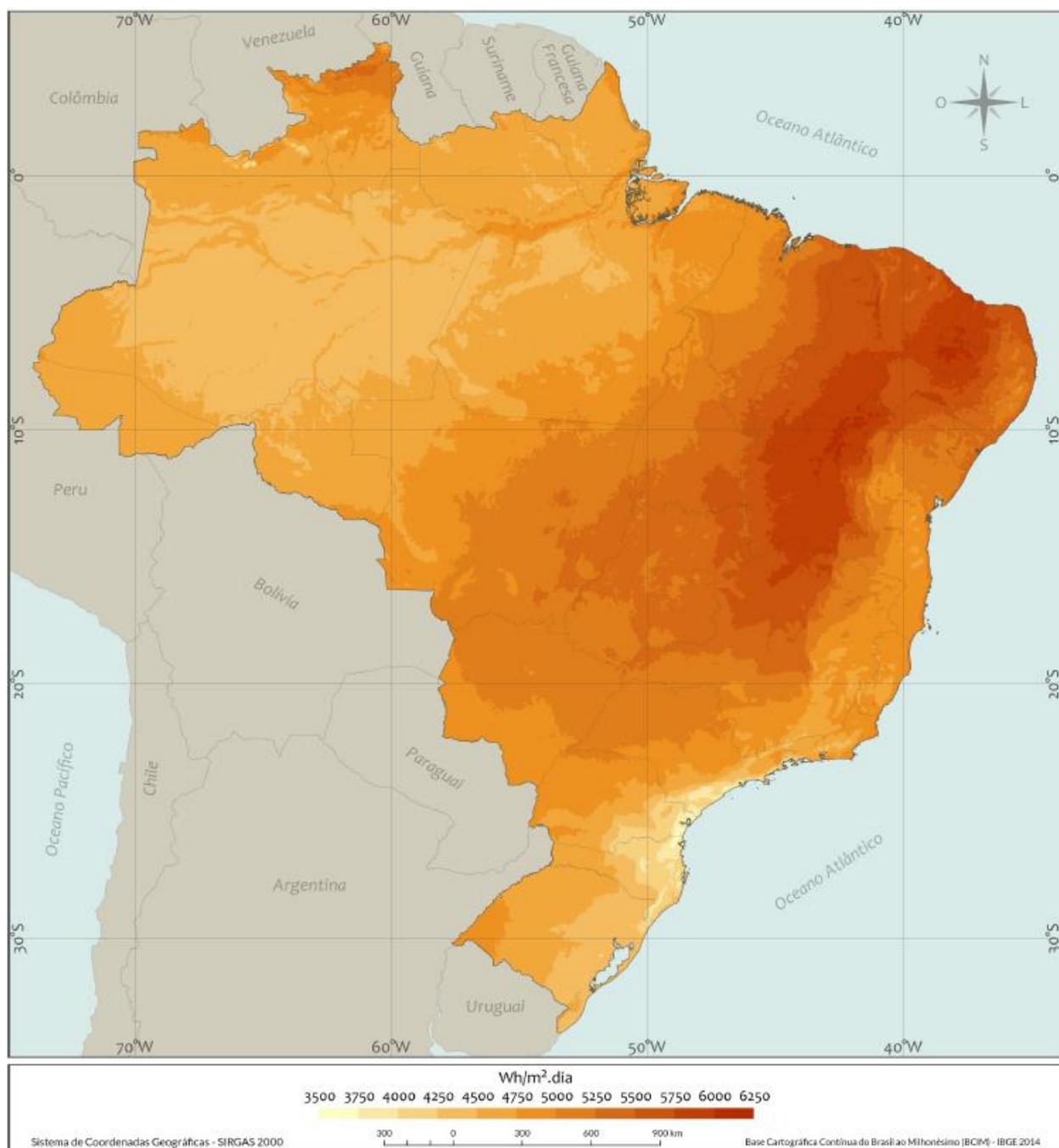


Figura 1 - Mapa do total diário de irradiação global horizontal média anual. Fonte: PEREIRA et al (2017).

O valor máximo ocorre no norte da Bahia - área que apresenta um clima semiárido e a menor irradiação média acontece no norte de Santa Catarina, região caracterizada por precipitação bem distribuída ao longo do ano. Os menores níveis de irradiação solar global horizontal são de 1.500 kWh/m<sup>2</sup>. ano, valor este superior aos máximos valores de irradiação solar global horizontal na Alemanha, cujo índice não ultrapassa 1.204,5 kWh/m<sup>2</sup>.ano (MOREIRA-JÚNIOR & SOUZA, 2020), demonstrando o forte potencial brasileiro no aproveitamento da energia solar, a qual pode ser usado de muitas formas, incluindo as aplicações em tecnologias ambientais, como é o caso do presente estudo.

## CAPÍTULO 4 – MATERIAS E MÉTODOS

### 4.1. Desenvolvimento da composteira giratória com aquecimento à base de energia solar

As composteiras fotovoltaicas giratórias aquecidas são tambores rotativos com controle de temperatura através de um sistema de serpentina acionado por um termostato (Figura 2). O seu desenvolvimento se deu em várias etapas.



**Figura 2 – Composteiras giratórias e aquecidas tendo como fonte energética um sistema fotovoltaico.**

Os motores usados são aqueles das máquinas dos vidros elétricos dos automóveis que necessitam de uma tensão de 12 Volts para seu funcionamento, possuindo uma Amperagem de 1,3 Amperes, com potência de 15,6 Watts e consumo de 0,37 kWh. Os motores foram conectados a uma bateria automotiva com tensão de 12 Volts e 180 Amperes. A bateria possui uma fonte carregadora, com objetivo de mantê-la em plena carga. Como um sistema de backup para o painel solar. O objetivo da fonte carregadora é converter a energia alternada que é oriunda da rede elétrica (220 V), para energia contínua (12 V) que vem da bateria. O painel solar possui as seguintes especificações:

- Eficiência energética (%) = 17,8
- Área externa do módulo (m<sup>2</sup>) = 1,94
- Produção média mensal de energia (kWh/mês) = 43,13
- Potência nas condições padrão (W) = 345

Um sistema fotovoltaico é o responsável por converter a luz solar em energia elétrica. Possuindo um controlador de carga (Solar Charge Controller). O controlador por sua vez tem a função de padronizar a carga que vem dos módulos fotovoltaicos para que a bateria receba uma tensão próxima a 13 V, que seria a tensão de carga para uma bateria 12 V. A bateria funciona como fonte de energia para manter o sistema em pleno funcionamento, servindo também como sistema de backup para o painel solar. O painel solar tem as seguintes especificações: eficiência energética (%) = 17,8; área externa do módulo (m<sup>2</sup>) = 1,94; produção média diária de energia de 1.437 W.dia<sup>-1</sup>. A composteira consome 2.800 W de energia por dia, enquanto dois painéis solares produzem 2.874 W.dia<sup>-1</sup>.

O sistema de aquecimento é realizado por uma resistência de chocadeira 12V com potência de 80 Watts. A resistência é controlada por um termostato que acompanha a temperatura do tambor e caso a temperatura fique abaixo da temperatura pré-ajustada, uma chave é ativada liberando energia da bateria para a resistência, causando assim o aquecimento. O esquema geral do sistema fotovoltaico é apresentado na Figura 3.

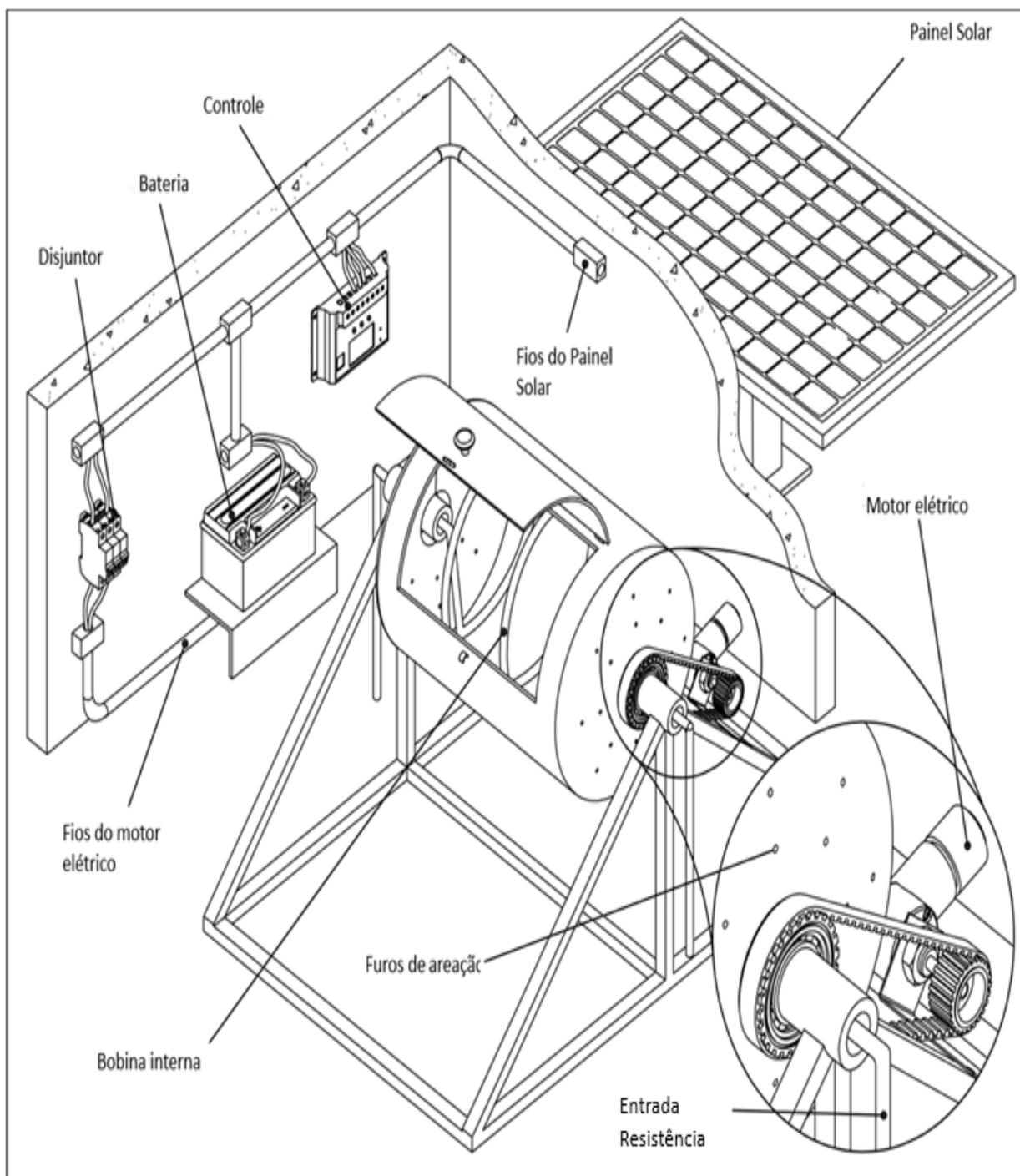


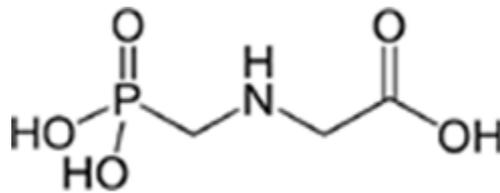
Figura 3 – Desenho esquemático do sistema de compostagem fotovoltaico. Fonte: Elaborada pelo autor (2022).

#### 4.2. Experiências de co-compostagem

O projeto foi conduzido num ambiente controlado, sem influência direta de vento ou chuvas, nas dependências do Instituto Federal Catarinense, campus Camboriú (IFC). A co-compostagem de 60 dias foi realizada em recipientes cilíndricos de metal com capacidade de 10 L, com espaço suficiente para mistura manual do composto. Os vasos foram perfurados

lateralmente em quatro alturas (5, 10 e 15 cm) para difundir os gases. Para obter a mistura inicial do composto, foram utilizados 5 Kg (base de peso úmido) de resíduo doméstico. Os resíduos domésticos (casca de batata, cenoura, alface, brócolis) foram triturados em liquidificador industrial e 1 Kg desta pasta (base peso seco) foi misturado com inóculo (200 g de esterco bovino, base peso seco) e 1 Kg de material de enchimento (base de peso seco) que era aparas de madeira de pinho.

A forma comercial de Glifosato (Glifosato DIPIL 480, Indústria Química DIPIL Ltda, Massaranduba, SC, Brasil) na concentração de 480 g.L<sup>-1</sup> foi utilizada neste ensaio. A estrutura molecular do Glifosato [N-(fosfonometil)-glicina] é mostrada na Figura 4. Considerando a biomassa do composto (2,2 Kg, peso seco), a concentração do Glifosato nas composteiras contaminadas foi de 0,218 g por g de composto seco.



**Figura 4 – Estrutura molecular do Glifosato [N-(fosfonometil)-glicina].**

A essas misturas sólidas foram adicionados 1000 mL de água destilada ou de uma solução de Glifosato 480 g.L<sup>-1</sup>, após, a mistura manual foi realizada na composteira clássica, enquanto na composteira fotovoltaica, o motor foi acionado e o tambor entrou em rotação (10 rpm.min<sup>-1</sup>). Na composteira fotovoltaica, o sistema de aquecimento com serpentina e termostato elevou a temperatura do composto para cerca de 38°C. Três réplicas de composteiras foram feitas em diferentes tempos para cada tratamento (um total de 12 compostagens). A umidade desejada (≈ 50%) foi controlada a cada 2 dias por meio da pesagem de amostras dos biorreatores, e o revolvimento do composto foi realizado a cada 2 dias nas primeiras duas semanas e depois semanalmente até 2 meses de co-compostagem no caso do sistema clássico.

O esquema experimental das composteiras é mostrado no Quadro 1, onde estão designadas as denominações dadas a cada composteira.

**Quadro 1 - Esquema experimental com as denominações dadas a cada composteira.**

<b>Tipo de composteira</b>	<b>Resíduos orgânicos</b>	<b>Resíduos orgânicos + Glifosato (0,218 g.g<sup>-1</sup>)</b>
Clássica	CRO	CROG
Fotovoltaica	FRO	FROG

As análises físico-químicas dos compostos (pH, demanda química e bioquímica de oxigênio - DQO e DBO) foram realizadas utilizando as metodologias prescritas pela EMBRAPA (2009) e APHA, AWWA, WPCF (2005). A demanda química e bioquímica de oxigênio foi medida em 50 g.L<sup>-1</sup> de solução de compostagem após maceração da amostra dos compostos com água destilada em um almofariz. O pH foi determinado em água usando uma relação lodo: água de 1:10. Os teores totais de C e N foram determinados por combustão a seco usando um analisador elementar LECO CN2000. Os gases SO<sub>2</sub> (dióxido de enxofre), NO<sub>2</sub> (dióxido de nitrogênio) e NH<sub>3</sub> (amônia) foram medidos usando detectores multigás portáteis VENTIS (modelo MX4). Para a análise do CO (monóxido de carbono), foi utilizado um medidor portátil INSTRUTHERM (modelo CO-6000). A determinação do CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) foi realizada utilizando um detector de qualidade do ar TEMTOP (modelo P1000).

A atividade microbiológica no sistema de co-compostagem foi avaliada pelo método do diacetato de fluoresceína (FDA) proposto por Schnürer & Rosswall (1982), com pequenas modificações. As amostras de composto (5 g) foram colocadas em tubos de centrífuga de policarbonato de 100 ml e foram adicionados 20 mL de tampão fosfato 30 mM (ajustado para pH 7,5). Os tubos foram agitados suavemente durante 30 min., após os quais foram adicionados 100 µL de uma solução FDA 2 mg.L<sup>-1</sup> em acetona. Um período adicional de 6 h de agitação foi então aplicado antes de terminar a reação através da adição de 20 ml de acetona. Os tubos de ensaio foram então centrifugados a 500 g durante 15 min, seguido de filtração do sobrenadante (Whatman 0,45 µm). O filtrado foi analisado para FDA por medição da absorbância a 490 nm usando um espectrofotômetro Turner. A análise da atividade enzimática hidrolítica foi realizada em triplicata para cada amostra de composto.

Como medida de precaução para evitar a disseminação ambiental de bactérias que estiveram em contato com o Glifosato, ao final dos experimentos o composto foi esterilizado em autoclave, antes de se dar a destinação no solo.

### 4.3. Detecção de produtos de degradação do glifosato

O monitoramento da degradação do glifosato foi feito segundo a metodologia publicada por Araújo et al. (2003). Assim, para analisar os produtos de degradação, 10 g de amostras de solo foram retiradas dos frascos e adicionadas a 40 mL de uma solução contendo 0,25 N  $\text{NH}_4\text{OH}$  e 0,1 N  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  e agitadas por 90 min. A mistura foi centrifugada a 3000 g por 20 min e o sobrenadante removido. Este procedimento foi repetido e os sobrenadantes foram reunidos e acidificados a pH 2,0 com HCl e o volume reduzido para menos de 5 mL sob vácuo em um evaporador rotativo em banho-maria ajustado a 60 °C. A solução concentrada foi ajustada para pH 1,8- 2.0 com hidróxido de amônio, transferido para um tubo de centrífuga e centrifugado a 3000 g por 10 min.

O sobrenadante foi então transferido para uma coluna de resina de troca catiônica ativada com 100 mL de HCl 0,01 M, com vazão de 2,5 mL.min<sup>-1</sup>. Glifosato e ácido aminometil fosfônico (AMPA) foram eluidos da coluna usando 5 X 20 mL de 0,1 M de ácido clorídrico, sendo o eluato evaporado até a secura em rotaevaporador e redissolvido em ácido fosfórico 0,08 M. Glifosato residual e AMPA foram derivados pós-coluna usando o reagente OPA-MERC e detectados usando um detector de fluorescência (Excitação 350 nm; Emissão 440 nm). Os tempos de retenção para glifosato e AMPA foram de 22 e 44 minutos, respectivamente.

### 4.4. Análise estatística

O software TOXSTAT 3.0 (Universidade de Wyoming, Laramie, Wyoming) foi usado para realizar a análise estatística. Os resultados são apresentados como média e desvio padrão (DP). A comparação entre os grupos foi feita por ANOVA aplicando-se o teste de Tukey ( $P \leq 0,05$ ), após verificação da normalidade (teste de Shapiro-Wilk) e homogeneidade de variância (teste de Hartley) dos dados. Letras diferentes acima das colunas da figura denotam diferença significativa entre as amostras.

## CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1. Desenvolvimento da composteira giratória com aquecimento à base de energia solar

Na região onde foi montado o sistema de compostagem, a irradiação horizontal global média anual é de  $4.134 \text{ Wh.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  com variações entre  $5.697 \text{ Wh.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  no verão e  $2.514 \text{ Wh.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  na estação de inverno (PEREIRA et al., 2017). Assim, utilizando energia fotovoltaica diretamente ou armazenada em baterias, as composteiras conseguiram funcionar 24 horas por dia sob a temperatura de  $48 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $\pm 3^\circ\text{C}$ ). A média de produção elétrica do sistema fotovoltaico (2 painéis solares) foi de  $2.874 \text{ W.dia}^{-1}$ , enquanto o consumo de eletricidade das composteiras apresentou média de  $2.800 \text{ W.dia}^{-1}$ .

### 5.2. Evolução dos parâmetros na co-compostagem

A Tabela 1 mostra os valores dos diferentes parâmetros mensurados para avaliar a evolução da co-compostagem nos 2 diferentes métodos de biodegradação.

**Tabela 1 - Parâmetros físico-químicos básicos do composto ao longo da evolução do processo biodegradativo nos controles.**

Parâmetro	Sistema de compostagem	Tempo de Biodegradação (dias)					
		0	5	10	15	30	60
pH <sup>a</sup> (a.u.)	Clássico	6,8	7,3	7,7	7,8	8,1	8,2
	Fotovoltaico	6,8	7,8	8,3	8,4	8,3	8,3
DQO <sup>b</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	Clássico	1182	852	691	492	285	102
	Fotovoltaico	1182	683	355	178	86	75
DBO <sup>b</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	Clássico	828	616	483	291	145	36
	Fotovoltaico	828	483	261	101	29	18
N <sub>NH3</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	Clássico	77,2	66,3	57,1	49,9	35,5	22,2
	Fotovoltaico	77,2	53,5	38,2	20,1	8,8	2,4
P <sub>orgânico</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	Clássico	28,2	22,3	15,8	10,2	4	1,3
	Fotovoltaico	28,2	16,1	7,6	3,3	1	0,4
C/N	Clássico	38	33	28	24	20	18
	Fotovoltaico	38	30	21	17	13	10
Temperatura	Clássico	27	32	42	55	37	24
	Fotovoltaico	27	50	60	65	50	50

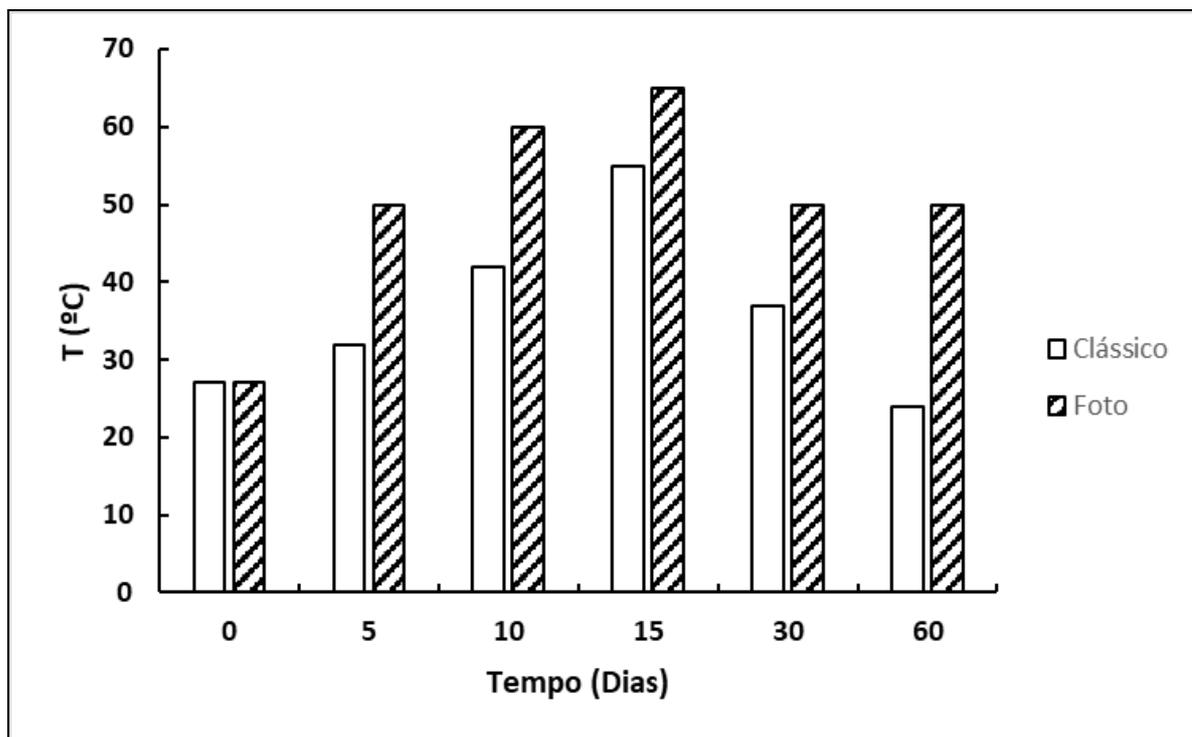
<sup>a</sup>Medido em  $50 \text{ g.L}^{-1}$  de solução de composto (a.u.= unidade arbitrária).

<sup>b</sup>Demanda química e bioquímica de oxigênio, medida em  $50 \text{ g.L}^{-1}$  solução de composto.

De acordo com os padrões medidos e mostrados na Tabela 1, o processo de compostagem clássico evoluiu dentro da normalidade, terminando entre 60 e 90 dias. A descrição mais detalhada dos parâmetros mais importantes para a biodegradação é mostrada nas Figuras 5 a 9. Através das Figuras de 5 a 9, verifica-se que as intensas transformações físico-químicas ocorrem nos primeiros 15 – 30 dias e após 60 dias do processo de compostagem, os parâmetros são relativamente estáveis com pequenas variações.

Em relação à compostagem realizado com o sistema fotovoltaico, a maior degradação da matéria orgânica ocorreu nos 30 primeiros dias, apresentado intensa degradação nos primeiros 10 dias. Importante destacar que os valores de DBO e DQO em ambos os sistemas estão relacionados à degradação da matéria orgânica solúvel obtida na trituração da amostra em água destilada.

Como a temperatura foi um fator controlado no experimento, a Figura 5 mostra a evolução da temperatura no sistema clássico e fotovoltaico.

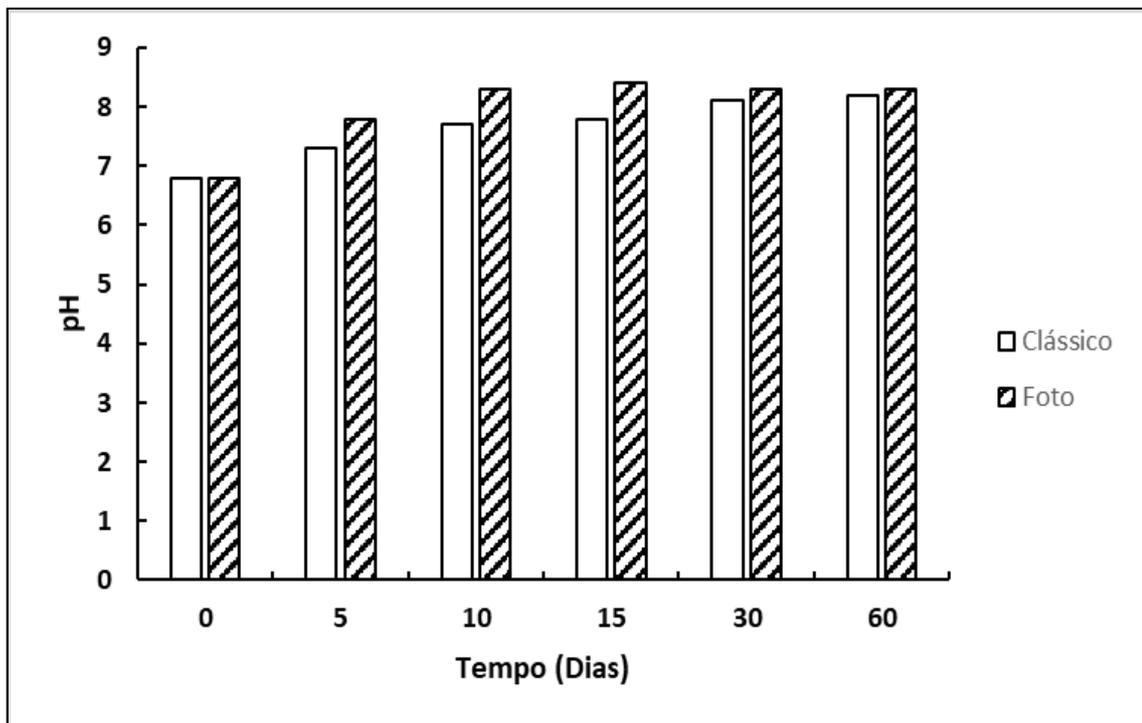


**Figura 5 - Evolução da temperatura (°C) durante a compostagem clássica e fotovoltaica.**

A Figura 5 mostra um gradiente crescente na temperatura da compostagem clássica até o décimo quinto dia. Durante a evolução, os microrganismos mesofílicos são substituídos por microrganismos termofílicos, que se desenvolvem em temperaturas mais altas, o que aumenta

a taxa de biodegradação. Para a composteira fotovoltaica aquecida por serpentina interna, a temperatura atinge 50°C rapidamente. Na fase termofílica, a temperatura aumenta ainda mais entre 5 e 30 dias de processo de compostagem, o que auxilia no controle de patógenos e sementes de plantas daninhas, onde a também o material orgânico se decompõe rapidamente, acelerando essa fase de biodegradação.

Na Figura 6 é apresentada a evolução do pH durante a compostagem nos sistemas de compostagem clássico e fotovoltaico.



**Figura 6 - Evolução do potencial hidrogeniônico (pH) durante a compostagem em compostagem clássica e fotovoltaica. Medido em 50 g.L<sup>-1</sup> de solução de composto (a.u.= unidade arbitrária).**

O processo de compostagem tem baixa sensibilidade as variações do pH, pois matéria orgânica com pH variável entre 3 e 11 pode ser biodegradada. No entanto, valores próximos da neutralidade são considerados ideais (5,5 a 8), pois é onde os microrganismos se adaptam melhor (GMACH et al., 2020). No início do processo, o pH está próximo da neutralidade, mas a estabilização ocorre após 10 dias no experimento com energia solar, enquanto no sistema de compostagem clássico, a chegada na estabilidade levou 30 dias para acontecer, atingindo valores de pH entre 7,0 e 8,5.

A evolução dos valores da demanda química de oxigênio durante as compostagens é

mostrada na Figura 7.

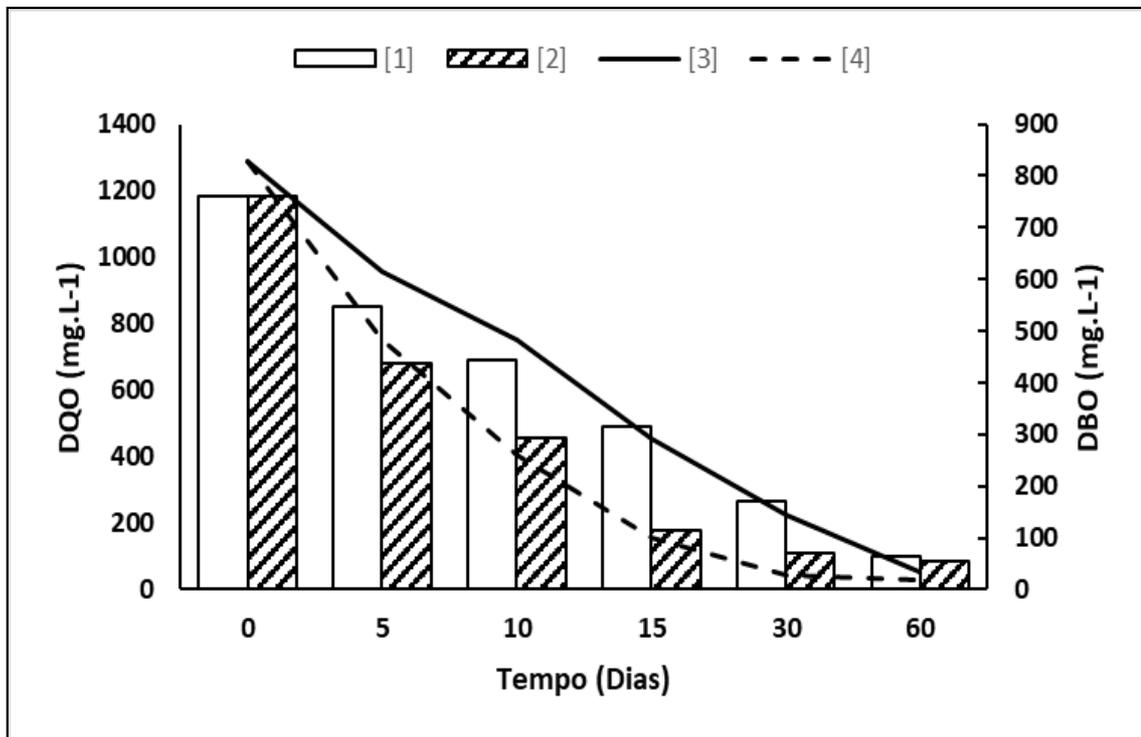


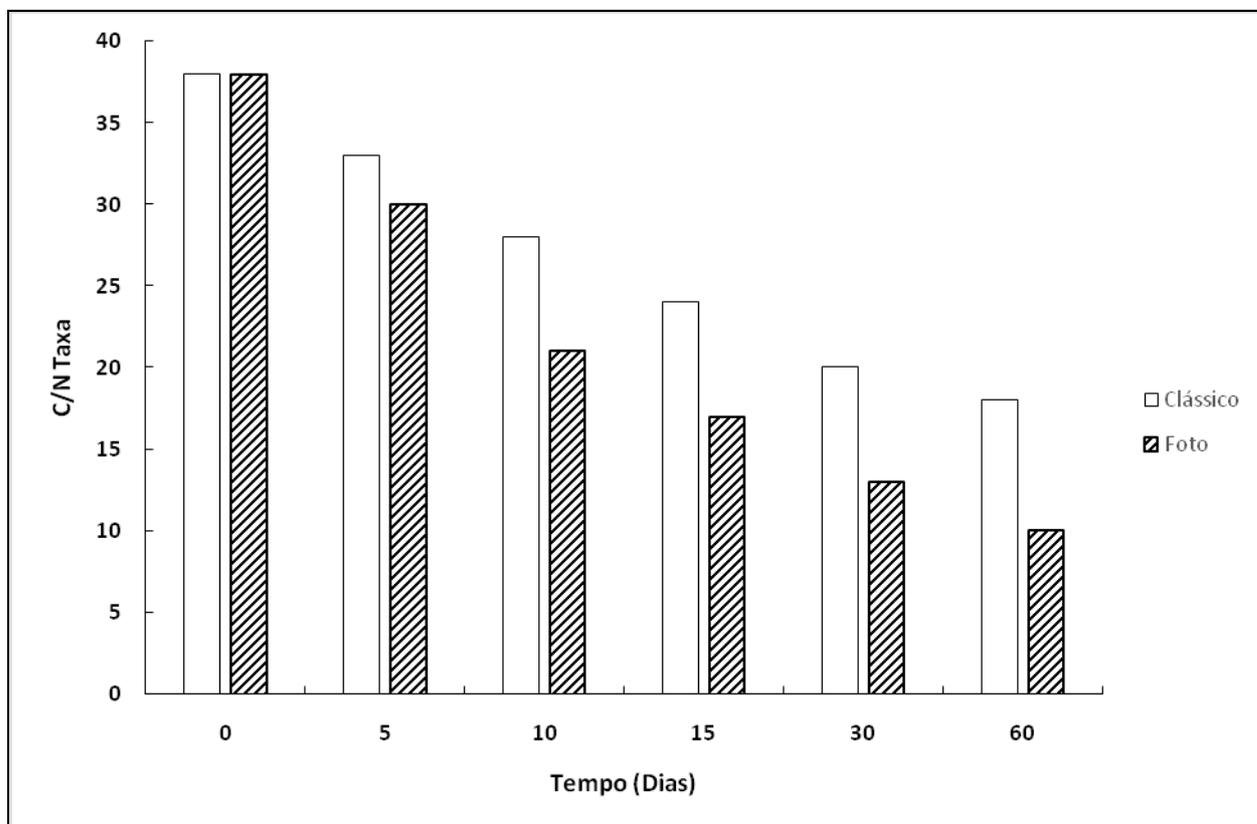
Figura 7 - Evolução da demanda química de oxigênio (DQO) e demanda bioquímica de oxigênio durante a compostagem clássica e fotovoltaica. Medido em 50 g.L<sup>-1</sup> de solução de compostagem (mg.L<sup>-1</sup>): [1] DQO Clássica; [2] DQO Foto; [3] DBO Clássica; [4] DBO Foto.

Como observado, houve uma redução de 58,4% no valor de DQO no caso da compostagem clássica, enquanto na composteira fotovoltaica, no mesmo período, obteve-se uma diminuição de 84,9%. A grande redução dos valores de DQO pode ser explicada pela pronta biodegradação do material compostado.

Em relação aos valores de DBO, após 15 dias de compostagem clássica houve redução de 64,8%, enquanto na composteira fotovoltaica esta diminuição foi de 87,8%. A relação DBO/DQO começa em 0,70 (i.e alta biodegradabilidade) para ambos os sistemas de biodegradação e após 60 dias, foi reduzida para 0,35 (i.e baixa biodegradabilidade) para compostagem clássica e 0,21 para a composteira fotovoltaica o que indica uma alta taxa de degradação dos compostos presentes no sistema.

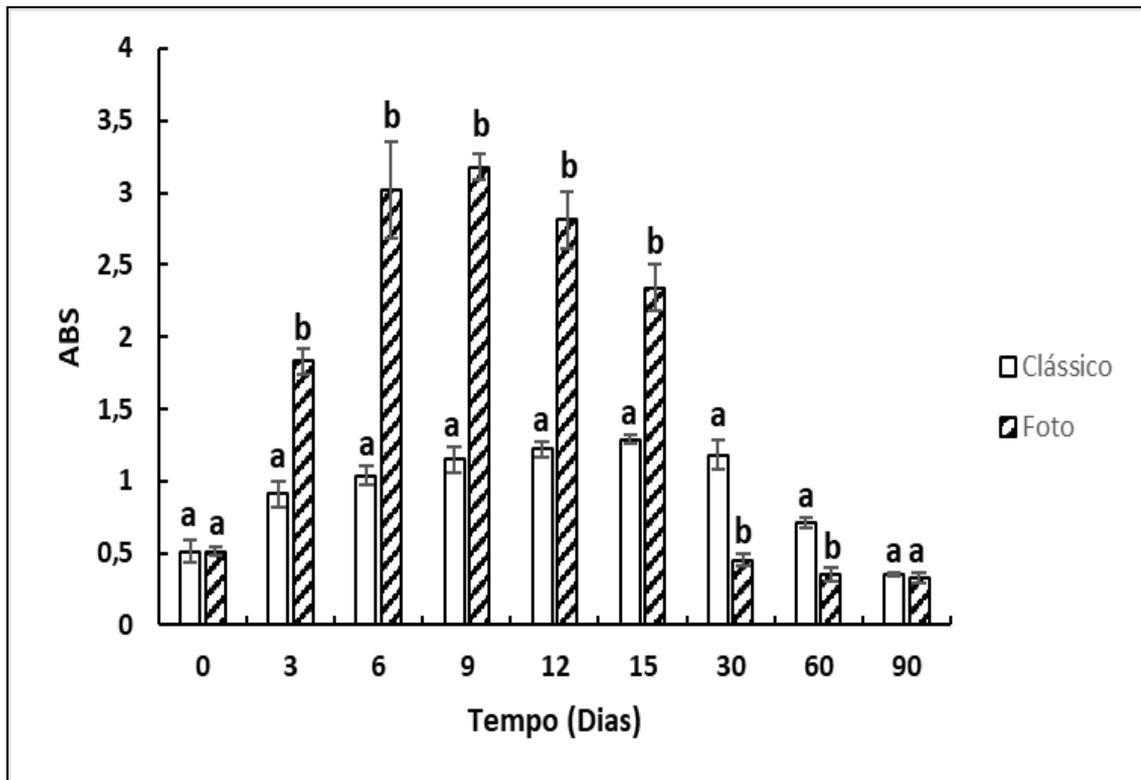
Os resíduos domésticos apresentam grande teor de nitrogênio e desta forma, a compostagem pode ser menos eficiente. Todavia, com adição de aparas de pinus, o N será consumido pelos microrganismos que evitam a perda de nitrogênio livre (HAUG, 1993). Vários autores têm utilizado a relação C/N como parâmetro durante a avaliação da maturação de

compostos orgânicos (KIEHL, 1985; INÁCIO & MILLER, 2009). A relação C/N baixa ( $< 20$ ) é ideal para um composto, já uma proporção de C/N em torno de 10:1 caracteriza-se como um composto humificado, enquanto o  $C/N > 20$  pode indicar que o composto não está estabilizado, ou seja, ainda sofre forte ação de microrganismos decompositores. A evolução da relação C/N durante a compostagem em sistemas de compostagem clássica e fotovoltaico é mostrada na Figura 8, abaixo.



**Figura 8 - Evolução da razão carbono/nitrogênio (C/N) durante a compostagem em compostagem clássica e fotovoltaica.**

A comunidade microbiológica que se desenvolve no processo de compostagem resulta de interações dinâmicas entre os microrganismos e o ambiente físico-químico da compostagem (SUN et al., 2021). No presente estudo, a atividade microbiológica no composto dos dois sistemas de biodegradação (isto é, composteira clássica e a fotovoltaica) foi avaliada periodicamente por meio do método de hidrólise de diacetato de fluoresceína (Figura 9).



**Figura 9 - Comparação da absorvância da formação de fluoresceína por microrganismos presentes nos sistemas de compostagem clássica e fotovoltaica.**

Vários outros estudos foram realizados usando a hidrólise do diacetato de fluoresceína (FDA) como medida da atividade microbiológica em diferentes amostras, como por exemplo solo natural e contaminado, lodo de sanitário, sedimentos e amostras de água (SANTOS & BETTIOL, 2003; LEVAKOV et al. 2021). A Figura 9 mostra que a atividade microbiológica foi significativamente diferente entre os dois sistemas de compostagem. Um aumento gradual da atividade microbiana do sistema de compostagem clássica pode ser observado desde o primeiro dia até o 15º dia, enquanto para a composteira fotovoltaica, esse aumento da atividade microbiológica ocorreu nos primeiros nove dias.

A eficiência de qualquer processo de compostagem é muito dependente da microbiologia presente no processo e a inoculação com esgoto sanitário, como foi feito, é um importante fator para diversificar e aumentar o número de microrganismos competentes para degradar resíduos vegetais (LIM et al., 2015). Em relação à comparação da atividade microbiana entre os dois sistemas, a compostagem fotovoltaica apresentou um aumento na atividade microbiológica comparativamente aos valores da compostagem clássica: 100 % no dia 3, 181 % no dia 6, 169 % no dia 9, 134 % no dia 12 e 75 % no dia 15. Após 30 dias de biodegradação, a atividade microbiológica no sistema clássico apresentou valores mais elevados do que a compostagem fotovoltaica.

Como pode ser observado comparando as Figuras 7 e 9, a atividade microbiológica para ambos os sistemas de compostagem acompanhou a tendência dos valores de DBO e aos 90 dias de compostagem, os baixos valores de hidrólise do FDA refletem os baixos valores de DBO nos compostos. O impacto do glifosato na atividade microbiológica de ambos os sistemas biodegradativos (ou seja, compostagem clássica e compostagem rotativa e aquecida) foi avaliado periodicamente por meio do método de hidrólise de diacetato de fluoresceína (Tabela 2 e Figura 10).

Assim, a Tabela 2 mostra que a degradação do Glifosato se dá entre 15 e 30 dias nas condições da compostagem clássica, onde se atingiu uma degradação de 91,7%, enquanto na compostagem pelo sistema fotovoltaico, em 10 dias chegou-se a esta mesma porcentagem de degradação da molécula do Glifosato. Nota-se na Tabela 2 que a maior biodegradação do Glifosato no sistema fotovoltaico aconteceu nos primeiros 5 dias com 79,8% das moléculas do pesticida sendo degradadas, ou seja, a microbiologia da fase mesófila da biodegradação já foi competente para degradar esta molécula.

Vale salientar que esta degradação não deve ter sido total (i.e., mineralização da molécula), pois a literatura registra que o Glifosato dá origem a um metabólito, o ácido aminometil fosfônico (AMPA), o qual não foi quantificado neste estudo, mesmo porque ele não tem ação pesticida (ARAÚJO et al., 2003). Estes resultados mostram claramente que o sistema de compostagem fotovoltaico apresenta um grande potencial biodegradador, pois o desenvolvimento rápido de muitos microrganismos facilita a decomposição de moléculas orgânicas que não sejam muito tóxicas para os microrganismos.

**Tabela 2 - Concentrações do Glifosato ao longo da evolução dos processos de biodegradação.**

Parâmetro	Sistema de compostagem	Tempo de Biodegradação (dias)				
		0	5	10	15	30
[Glifosato –mg.g <sup>-1</sup> ]	Clássico	0,109	0,077	0,045	0,018	0,001
		±0,007	±0,007	±0,005	±0,003	±0,001
	Fotovoltaico	0,109	0,022	0,001	0,001	-
		±0,007	±0,004	±0,002	±0,001	

Os resultados da hidrólise do FDA na Figura 10 mostram que a atividade microbiológica não foi afetada pela presença de pesticidas, uma vez que não foram observadas diferenças

estatísticas entre ensaio sem contaminação por glifosato (Figura 9) e ensaio com biorreatores de glifosato (Figura 10), tanto para compostagem clássica quanto composteira rotativa. Assim, a composteira rotativa apresentou diferenças significativas na atividade microbiológica nos diferentes tempos de co-compostagem, mas o mesmo perfil foi observado para a compostagem clássica. Desta forma, houve aumento nos primeiros 9 dias e diminuição da atividade microbiológica entre os dias 9 a 60 dias e para compostagem clássica. Em definitivo, o perfil de atividade microbiológica das Figuras 9 e 10 são bastante semelhantes, não mostrando nem uma inibição e nem uma estimulação da atividade microbiológica devido a presença do glifosato no sistema de co-compostagem.

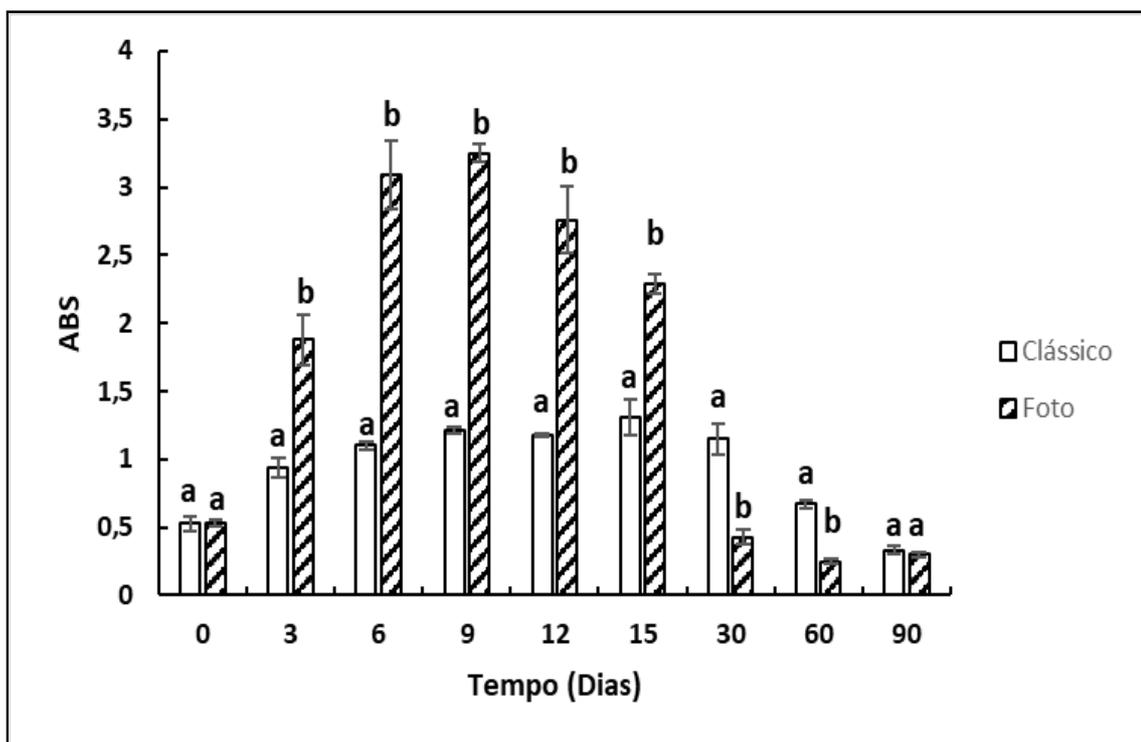


Figura 10 - Comparação da absorvância do tempo da hidrólise do diacetato de fluoresceína por microrganismos presentes nos sistemas de co-compostagem clássica e rotativa e aquecido contaminados com glifosato.

Por fim, uma análise semiquantitativa permite verificar a diferença na emissão de gases de efeito estufa dos dois sistemas de compostagem (Tabela 3). Os valores mostram que a composteira fotovoltaica não contribui significativamente com as emissões de  $\text{CH}_4$  e  $\text{NO}_x$ , sendo que estes 2 gases são mais perniciosos que o  $\text{CO}_2$  para contribuição ao efeito estufa, uma vez que a molécula de  $\text{CH}_4$  absorve 28 vezes mais energia infravermelha que a molécula de  $\text{CO}_2$  (IPCC, 2014).

Os dados apresentados na Tabela 3 são para comparação simples de sistemas de compostagem, uma vez que a emissão de gases em processos biodegradáveis é um assunto bastante complexo, onde muitas variáveis podem influenciar na qualidade e quantidade dos gases emitidos. Uma discussão mais aprofundada sobre essa questão pode ser vista no trabalho de Sayara & Sánchez (2021).

**Tabela 3 - Composição relativa dos gases emitidos pelos sistemas biodegradáveis de composteira clássica e fotovoltaica.**

Parâmetro	Sistema de compostagem	Tempo de biodegradação (dias)					
		0	3	6	9	12	15
CH <sub>4</sub> (%)	Clássico	0	3,13	4,11	5,19	5,05	4,18
	Fotovoltaico	0	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
CO <sub>2</sub> (%)	Clássico	0	95,21	94,32	93,43	93,65	94,04
	Fotovoltaico	0	99,76	99,31	99,65	99,16	99,82
NO <sub>x</sub> (%)	Clássico	0	0,75	0,82	0,77	0,83	0,75
	Fotovoltaico	0	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

## CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES

O sistema de compostagem fotovoltaico foi desenvolvido para ser energeticamente sustentável, permitindo um controle de agitação/aeração, temperatura interna e de umidade. Esses aspectos favorecem o rápido desenvolvimento de uma microbiologia aeróbica termofílica muito diversificada, onde ocorre a maior parte da biodegradação. Essas melhorias técnicas permitem que a biodegradação ocorra em condição totalmente aeróbica, fazendo que a biodegradação seja mais completa (i.e., maior taxa de mineralização) e mais rápida que a compostagem clássica, evitando a formação de zonas anaeróbicas que poderiam emitir mais gases nocivos que contribuam para agravar o efeito estufa.

Desta forma, a compostagem com auxílio da energia solar apresentou maior eficiência na diminuição dos valores dos parâmetros físico-químicos básicos em relação a compostagem tradicional para os primeiros 15 dias, sendo que durante este período, o valor da demanda química de oxigênio houve foi menor em 22,9 % na composteira fotovoltaica, enquanto para a demanda bioquímica de oxigênio obteve-se uma redução no valor de 38,6 %. Os outros valores verificados no composto da composteira fotovoltaica foram menores que os valores encontrados no composto gerado na compostagem clássica. Assim, observou uma diminuição de 24,5% para o nitrogênio amoniacal e 18,4% para o fósforo orgânico.

Outro ponto que apresenta uma melhora é a produção de gases que contribuem para a piora na qualidade ambiental (i.e., efeito estufa). No acumulado de 15 dias, a compostagem clássica apresentou uma produção de metano 21,7% e de dióxidos de nitrogênio 3,9% maiores do que a compostagem fotovoltaica.

A taxa de degradação do Glifosato também apresentou diferença entre os sistemas de compostagem, onde para os 5 dias iniciais dos experimentos, o sistema de compostagem fotovoltaico obteve uma redução 79,8 % em contraparte de 29,4 % do processo natural. Assim, a maior eficiência na biodegradação deste composto possivelmente é devido ao controle da temperatura no sistema da composteira fotovoltaica, onde a média nos 60 dias de compostagem foi de 50,3 °C contra 36,2 °C da compostagem clássica. Desta maneira, o aumento e a manutenção da temperatura proporcionaram maior atividade enzimática, variando de 50,3 % (terceiro dia) a 44,9% (décimo quinto dia).

Este modelo de composteira fotovoltaica pode ser construído em qualquer tamanho, bastando adaptar o sistema fotovoltaico para o seu correto fornecimento de energia. Assim, o uso de composteira fotovoltaica permite tratar grandes quantidades de resíduos orgânicos de forma mais rápida e automatizada e com algumas melhorias tecnológicas permitirão monitorar a evolução da biodegradação por um sistema remoto baseado em sensores. Além disso, recomenda-se a realização de mais estudos de co-compostagem com alguns contaminantes biodegradáveis adicionados ao sistema de compostagem, uma vez que a compostagem fotovoltaica é claramente mais eficiente para biodegradar compostos do que a compostagem clássica. Também se recomenda aprimoramento no que diz respeito à manutenção de temperaturas de sanitização termofílicas por um longo tempo, ou seja, maiores que 55°C conforme o recomendado pela norma da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA, 2003) no que tange a regulamentação e tecnologia ambientais para o controle de patógenos e atração de vetores em lodo de esgoto. Esta característica de desinfecção do composto é um tema que merece uma atenção à parte, visto a complexidade de microrganismos presentes em muitos resíduos sólidos destinados à biodegradação.

Quanto à viabilidade técnica de uma composteira fotovoltaica, esta só tem o investimento inicial e em seguida só terão os custos de manutenção devido ao desgaste dos equipamentos. O custo do investimento dependerá da escala que o equipamento será fabricado. Assim, em função do ganho de tempo na produção do composto que poderá ser comercializado, deduz-se que a composteira fotovoltaica apresenta grande viabilidade técnica, pois diminui grandemente o tempo de compostagem e rende um composto de melhor qualidade, inclusive com menor emissão de gases que contribuem para o efeito estufa.

Espera-se que este trabalho sirva de ponto de partida para o aprimoramento desta tecnologia de biodegradação auto-sustentável do ponto de vista energético, a qual pode gerar um composto de interesse comercial, satisfazendo os princípios da economia circular.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRELPE. 2020. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020**. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE, p. 51, 2020.
- ADANI, F.; GENNEVINI, P.L.; TAMBONI, F. 1995. **A new index of organic matter stability**. *Compost Sci. Util*, 3, 25-37.
- ADUAN, R. E.; VILELA, M. DE F.; REIS JÚNIOR, F. B. DOS. 2004. **Os Grandes Ciclos Biogeoquímicos Do Planeta**. PLANALTINA: EMBRAPA.
- AHMAD, R., JILANI, G., ARSHAD, M., ZAHIR, Z.A., KHALID, A. 2007. **Bio-conversion of organic wastes for their recycling in agriculture: an overview of perspectives and prospects**. *Annals of Microbiology*, 57 (4) 471-479.
- AHMADI, T., CASAS, C. A., ESCOBAR, N., & GARCÍA, Y. E. 2020. **Municipal organic solid waste composting: development of a tele-monitoring and automation control system**. *Agronomy Research* 18, 1911–1925. <https://doi.org/10.15159/ar.20.212>.
- AL-RUMAIHI, A.; MCKAY, G.; MACKAY, H.R.; AL-ANSARI, T. 2020. **Environmental Impact Assessment of Food Waste Management Using Two Composting Techniques**. *Sustainability*, 12, 1595. <https://doi.org/10.3390/su12041595>.
- ARAUJO, A. S. F.; MONTEIRO, R. T. R.; ABARKELI, R. B. 2003. **Effect of glyphosate on the microbial activity of two Brazilian soils**. *Chemosphere* 52: 799–804.
- AYE, L.; WIDJAYA, E.R. 2005. **Environmental and economic analyses of waste disposal options for traditional markets in Indonesia**. *Waste Manag.*, 26, 1180–1191.
- BLAYLOCK R. L. 2015. **Civility in scientific publishing: the glyphosate paper**. *Surg Neurol Int* 6:163–163
- BOLDRIN, A.; ANDERSEN, J.K.; MOLLER, J.; CHRISTENSEN, T.H.; FAVOINO, E. 2009. **Composting and compost utilisation: Accounting of greenhouse gases and global warming contributions**. *Waste Manag. Res.*, 27, 800–812
- CAMPOS, A.L.O.; BLUNDI, C. E. 1998. **Avaliação de matéria orgânica em compostagem: metodologia e correlações**. In: *Gestão ambiental en el siglo XXI*. Lima. Anais eletrônicos... APIS, 1998. p 1-17.
- CERRI, C. E. P. 2008. **Compostagem**. São Paulo: Programa de Pós – Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior. de Agricultura Luiz Queiroz, Universidade de São Paulo.19 p.
- CHIU, S. L. H.; LO, I. M. C. 2016. **Reviewing the anaerobic digestion and co-digestion process of**

**food waste from the perspectives on biogas production performance and environmental impacts.** Environ. Sci. Pollut. Res., 23, 24435–24450.

CORDEIRO, N. M. 2010. **Compostagem de resíduos verdes e avaliação da qualidade dos compostos obtidos: caso de estudo da algar S.A.** 102 p. Tese (Mestrado em Engenharia do Ambiente – Tecnologias Ambientais) – Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

COSTA, A. R. S.; XIMENES, T. C. F.; XIMENES, A. F.; BELTRAME, L. T. C. 2015. **O processo da compostagem e seu potencial na reciclagem de resíduos orgânicos.** Revista GEAMA, 1, 246-260. ISSN 2447-0740 (online)

COUTURE, F. 1988. **Étude sur le compostage des boues de stations d'épuration municipales.** Maîtrise en Environnement. Faculté des Sciences. Université de Sherbrooke. Sherbrooke. Québec. 108p.

FAO. 2015 **Farmer's Compost Handbook. Experiences in Latin America.** Román, P.; Pantoja, M.M.A. (eds). Food and Agriculture Organization of the United Nations Regional Office for Latin America and the Caribbean Santiago. ISBN 978-92-5-107844-0

FARHAD, W.; CHEEMA, M.A.; HAMMAD, H.M.; SALEEM, M.F.; FAHAD, S.; ABBAS, F.; KHOSA, I.; BAKHAT, H.F. 2018. **Influence of composted poultry manure and irrigation regimes on some morpho-physiology parameters of maize under semiarid environments.** Environ. Sci. Pollut. Res., 25, 19918-19931.

FARIA M. A. 2015. **Glyphosate, neurological diseases—and the scientific method.** Surg Neurol Int 6:132–132

FOGARTY, A. M.; TUOVINEN, O. H. 1991. **Microbiological Degradation of Pesticides in Yard Waste Composting.** Microbiological Reviews, 55 (2): 225-233.

GARCIA, C.; HERNANDEZ, T.; COLL, M. D.; ONDOÑO, S. 2017. **Organic amendments for soil restoration in arid and semiarid areas: a review[J].** AIMS Environmental Science, 2017, 4(5): 640-676. <https://doi.org/10.3934/environsci.2017.5.640>

GAUTHIER, H.; YARGEAU, V.; COOPER, D. G. 2010. **Biodegradation of pharmaceuticals by *Rhodococcus rhodochrous* and *Aspergillus niger* by co-metabolism.** Sci. Total Environ., 408, 1701–1706

GIKAS, P.; ZHU B.; BATISTATOS, N. I.; ZHANG, R. 2018. **Evaluation of the rotary drum reactor process as pretreatment technology of municipal solid waste for thermophilic anaerobic digestion and biogas production.** J. Environ Manage 216:96–104. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.07.050>.

GMACH, M. R.; CHERUBIN, M. R.; CERRI, C. E. P. 2020. **Processes that influence dissolved organic matter in the soil: a review.** SCIENTIA AGRICOLA, v. 77, p. e20180164.

GOLUEKE, C. G. 1992. **Bacteriology of composting.** BioCycle, 33: 55-57

GOUVEIA, J .G. 2012. **Diretrizes para uso de composto orgânico na agricultura: proposta para municípios com até 100.000 habitantes**. 94 p. Tese (Mestrado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia.

HAO, X.; Chang, C.; Larney, F. J. 2004. **Carbon, Nitrogen balances and greenhouse gas emission during cattle feedlot manure composting**. J. Environ. Qual., 33, 37–44.

HAUG, R. 1993. **The Practical Handbook of Compost Engineering**; Lewis Publishers: Boca Raton, FL, USA.

HAZARIKA, J.; KHWAIRAKPAM, M. 2018. **Evaluation of biodegradation feasibility through rotary drum composting recalcitrant primary paper mill sludge**. Waste Manag 76:275–283. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.03.044>

IARC. 2015 Monographs, volume 112: **Some organophosphate insecticides and herbicides: tetrachlorvinphos, parathion, malathion, diazinon and glyphosate**. IARC working group. Lyon; 3–10 march 2015.

INÁCIO, C. T.; MILLER, P. R. M. 2009. **Compostagem: Ciência e prática aplicadas a gestão de resíduos. 2009**; ISBN: 978-85-85864-31-6. Embrapa Solos: Rio de Janeiro (Brazil).

INSAM, H.; BERTOLDI, M. 2007. **Microbiology of the composting process**. Compost Science and Technology, Waste Management Series, Elsevier Ltd. p. 25-48.

IPCC, 2014: **Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

IQBAL, A.; LIU, X.; CHEN, G. 2020. **Municipal solid waste: Review of best practices in application of life cycle assessment and sus-tainable management techniques**. Sci. Total Environ., 729, 138622

KEENER, H. M.; EKINCI K.; MICHEL F. C. 2005. **Composting Process Optimization – Using On/Off Controls**, Compost Science & Utilization, 13:4, 288-299, [https://doi.org/10.1080/\\_1065657X.2005.10702253](https://doi.org/10.1080/_1065657X.2005.10702253)

KI, B. M.; KIM, Y. M.; JEON, J. M.; RYU, H. W.; CHO, K. S. 2017. **Characterization of bacterial community dynamics during the decomposition of pig carcasses in simulated soil burial and composting systems**. J. Microbiol. Biotechnol., 27, 2199-2210

KIEHL, E.J. 1985. **Fertilizantes Orgânicos**. Ceres: São Paulo (Brazil).

KIEHL, E. J. 1998. **Manual de compostagem: maturação e qualidade do composto**. 1<sup>ed</sup>. 1998; Ceres: Piracicaba (Brazil).

LEVAKOV, I.; RONEN, Z.; SIEBNER, H.; DAHAN, O. 2021. **Continuous in-situ measurement of free extracellular enzyme activity as direct indicator for soil biological activity**. Soil Biology and Biochemistry, 163,108448. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108448>.

- LIM, L. Y.; BONG, C. P. C.; CHUA, L. S.; LEE, C. T. 2015. **Physicochemical profile of microbial-assisted composting on empty fruit bunches of oil palm trees.** Environ. Sci. Pollut. Res. 22, 19814-19822.
- LIMA, I. B.; BOËCHAT, I. G.; GÜCKER, B. 2021. **Glifosato no Brasil: uso, contaminação aquática, efeitos ambientais e perigos para a saúde humana.** Cadernos de Geografia, 31, 90-115.  
DOI: <https://doi.org/10.5752/P.2318-2962.2021v31nesp1p90>
- MANADIAKIS, K.; LASARIDI, K.; MANIOS, Y.; KYRIACOU, M.; MANIOS, T. 2004. **Integrated waste management through producers and consumers education: composting of vegetable crop residues for reuse in cultivation.** J. Environ. Sci. Health B., 39, 169-183.
- MOREIRA JÚNIOR, O.; SOUZA, C. C. de. 2020. **Aproveitamento fotovoltaico, análise comparativa entre Brasil e Alemanha.** INTERAÇÕES 21, 379-387.
- NAS, B.; ARGUN, M. E.; DOLU, T.; ATEŞ, H.; YEL, E.; KOYUNCU, S.; DINÇ, S.; KARA, M. 2020. **Occurrence, loadings and removal of EU-priority polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in wastewater and sludge by advanced biological treatment, stabilization pond and constructed wetland.** J. Environ. Manag., 268, 110580
- PEDERSEN, D. C. 1983. **Effectiveness of Sludge Treatment Processes in Reducing Levels of Bacteria, Viruses, and Parasites.** 9-31 pp. Dans: Binlofical Health Risk of Sludge Disposable. Éditeur: University Calgary Press. Canada.
- PELCZAR, M. J. Jr.; REID R. D.; CHAN, E. C. S. 1977. **Microbiology.** 4th Edition. McGrawHill. États-Unis. 952p.
- PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. 2017. **Atlas brasileiro de energia solar.** 2.ed. São José dos Campos: INPE. 80p. Disponível em: <http://doi.org/10.34024/978851700089>
- PEREIRA NETO, J. T.; LELIS, M. P. N. 1999. **Importância da umidade na compostagem: uma contribuição ao estado da arte.** In . Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, AIDIS. Desafios para o saneamento ambiental no terceiro milênio. Rio de Janeiro: ABES, p. 1-9.
- PIGOLI A.; ZILIO M.; TAMBONE F.; MAZZINI S.; SCHEPIS M.; MEERS E.; SCHOUMANS O.; GIORDANO A.; ADANI F. 2021. **Thermophilic Anaerobic Digestion as Suitable Bioprocess Producing Organic and Chemical Renewable Fertilizers: A Full-Scale Approach.** *Waste Manage.* 2021, 124, 356–367. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.02.028>
- PIRES. A. B. 2011. **Análise de Viabilidade Econômica de um Sistema de Compostagem Acelerada para Resíduos Sólidos Urbanos.** 65 f. Trabalho de Conclusão (Graduação Universidade Federal Rural de Pernambuco REVISÃO CIENTÍFICA Departamento de Tecnologia Rural.
- REN21. 2020. **Renewables 2022 global status report.** Disponível em: [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022\\_Full\\_Report.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2022_Full_Report.pdf).
- RUSSO, M. A. T. 2003. **Tratamento de resíduos sólidos.** Coimbra: Departamento de Engenharia

Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra. 2003. 196 p.

SAER, A.; LANSING, S.; DAVITT, N. 2013. **Life cycle assessment of a food waste composting system.** Environmental impact hotspots. J. Clean. Prod., 52, 234–244.

SÁNCHEZ, A.; ARTOLA, A.; FONT, X.; GEA, t.; BARRENA, R.; GABRIEL, D.; SÁNCHEZ-MONEDERO, M. A.; ROIG, A.; CAYUELA, M. L.; MONDINI, C. 2015. **Greenhouse gas emissions from organic waste composting.** Environ Chem Lett 13, 223–238. <https://doi.org/10.1007/s10311-015-0507-5>

SÁNCHEZ, Ó.S.; OSPINA, D.A.; MONTOYA, S. 2017. **Compost supplementation with nutrients and microorganisms in composting process.** Waste Manag., 69, 136-153.

SANTOS, I., BETTIOL, W. 2003. **Effect of sewage sludge on the rot and seedling damping-off of bean plants caused by *Sclerotium rolfsii*.** Crop Protection 22, 1093–1097

SAYARA, T.; SÁNCHEZ, A. 2021. **Gaseous Emissions from the Composting Process: Controlling Parameters and Strategies of Mitigation.** Processes, 9, 1844. <https://doi.org/10.3390/pr9101844>.

SCHNÜRER, J., ROSSWALL, T. 1982. **Fluorescein diacetate hydrolysis as a measure of total microbial activity in soil and litter.** Appl. Environ. Microb. 6, 1256–1261.

SHARMA D.; YADAV K. D.; KUMAR, S. 2018. **Role of sawdust and cow dung on compost maturity during rotary drum composting of flower waste.** Bioresour Technol 264:285–289. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.05.091>

SITI, F. Z.; ELALAMI, M.; BERAICH, F. Z.; AROUCH, M.; QANADLI, S. D. 2021. **Design and Production of an Autonomous Rotary Composter Powered by Photovoltaic Energy.** International Journal of Engineering Trends and Technology 68, 1-4. <https://www.ijettjournal.org/assets/Volume-69/Issue-7/IJETT-V69I7P227.pdf>

SMITH, J. L.; PAUL, E. A. 1998. **The significance of soil microbial biomass estimations.** Soil Biochem., 6, 357-393.

SUN, L., LONG, M., LI, J., WU, R., MA, L., TANG, D., LU, Y., WANG, Z. 2021. **Different Effects of Thermophilic Microbiological Inoculation with and Without Biochar on Physicochemical Characteristics and Bacterial Communities in Pig Manure Composting.** Frontiers in Microbiology 12. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmicb.2021.746718>

TESTOLIN, R C.; FEUZER-MATOS, A. J.; COTELLE, S.; ADANI, F.; JANKE, L.; POYER-RADETSKI, G.; PEREIRA, A. C. ; ARIENTE-NETO, R.; SOMENSI, C. A. ; RADETSKI, C. M. 2021. **Using textile industrial sludge, sewage wastewater, and sewage sludge as inoculum to degrade recalcitrant textile dyes in a co-composting process: an assessment of biodegradation efficiency and compost phytotoxicity.** Environmental Science and Pollution Research, v. 28, p. 13542-13549.

USEPA, 2003. **Environmental Regulations and Technology. Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge (under 40 CFR Part 503).** United States Environmental Protection

Agency, Office of Research and Development. Cincinnati, OH, USA. , pp. EPA/625/R-692/013. 186 pp.

VALENTE, B. S.; XAVIER, E. G.; JAHNKE, D. S.; BRUM JR., B. DE S.; CABRERA, B. R.; MORAES, P. O.; LOPES, D. C. N. 2009. **Fatores que afetam o desenvolvimento da compostagem de resíduos orgânicos**. Arch. Zootec. 58, 59-85.

VANDERMEERSCH, T.; ALVARENGA, R.A.F.; RAGAERT, P.; DEWULF, J. 2014. **Environmental sustainability assessment of food waste valorization options**. Resour. Conserv. Recycl., 87, 57–64.

WARE, A.; POWER, N. 2016. **Biogas from cattle slaughterhouse waste: Energy recovery towards an energy self-sufficient industry in Ireland**. Renew. Energ., 97, 541-549.

YANG, C. W.; LIU, C.; CHANG, B. V.; 2020. **Biodegradation of Amoxicillin, Tetracyclines and Sulfonamides in Wastewater Sludge**. Water, 12, 2147; doi:10.3390/w12082147

ZENG, G.; YU, Z.; CHEN, Y.; ZHANG, J.; LI, H.; YU, M.; ZHAO, M. 2011. **Response of compost maturity and microbial community composition to pentachlorophenol (PCP)-contaminated soil during composting**. Bioresour. Technol., 102, 5905-5911.

ZHANG, W.; LAU, A. K.; WEN, Z. S. 2009. **Preventive control of odor emissions through manipulation of operational parameters during the active phase of composting**. J. Environ. Sci. Health B., 44, 496-505.