

Avaliação da degradabilidade de material base para embalagens biodegradáveis com a inserção de resíduos sólidos orgânicos a partir do processo de compostagem

Evaluation of the degradability of base material for biodegradable packaging with the insertion of organic solid waste through the composting process

Marcos Vinícius da Luz¹; Carlos Casturino Bueno da Silva Cruz²;
Juliana Bonametti Olivato³; Tatiane Bonametti Veiga⁴.

¹Engenheiro Ambiental, Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, Paraná, Brasil.
Orcid: <https://orcid.org/0009-0006-7183-512X>. E-mail: marcosvinidaluz@gmail.com.

²Mestre em Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, Paraná, Brasil.
Orcid: <https://orcid.org/0009-0000-0985-3892>. E-mail: carlosbuenoambiental@gmail.com

⁴Professora do Programa de Pós-Graduação em Ciências Farmacêuticas e do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, Paraná, Brasil.
Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6463-6380>. E-mail: jubonametti@gmail.com

⁴Professora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, Paraná, Brasil. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-6919-4013>. E-mail: tatianeveiga@unicentro.br

RESUMO: A intensificação do uso de materiais plásticos, nas últimas décadas, tem ocasionado diversos impactos ambientais, tornando-se incentivos diretos para pesquisa e desenvolvimento de alternativas que minimizem a massiva quantidade de plásticos utilizada pelas sociedades. Neste âmbito, despontam os materiais ditos biodegradáveis, com destaque aos compostos a base de amido, que, embora apresentem propriedades mecânicas limitadas e baixa resistência a água, permitem a mistura com agentes de reforço diversos, a fim de contornar as carências para sua aplicação em maiores escalas sem prejudicar seu foco na biodegradabilidade. Neste sentido, o presente estudo objetivou avaliar a biodegradabilidade de um biopolímero a base de amido, com adição de diferentes proporções de bagaço de malte, este, resíduo oriundo do processo produtivo da cerveja; avaliando e acompanhando parâmetros do processo de compostagem dessa mistura com resíduos sólidos orgânicos. A biodegradação foi determinada a partir da avaliação visual do material, sendo monitorados parâmetros como pH, temperatura, umidade e matéria orgânica, sendo registrados em planilha eletrônica para análise descritiva dos dados. Os resultados obtidos, quando comparados a unidade de compostagem controle, indicam uma menor atividade biológica sobre o composto, conseqüentemente, uma maior resistência a biodegradação. Após três semanas de compostagem foi difícil a identificação do material e após quatro semanas, não era possível a identificação do biopolímero, indicando sua biodegradação e incorporação no substrato. Observou-se que o material apresentou alteração em suas propriedades mecânicas durante a compostagem. Conclui-se que o material é totalmente biodegradável em todas as composições do bagaço de malte, em condições de compostagem.

Palavras-chave: Compostagem, polímeros biodegradáveis, gestão de resíduos sólidos, valorização de resíduos.

ABSTRACT: *The intensification of the use of plastic materials in recent decades has caused several environmental impacts, becoming direct incentives for research and development of alternatives that minimize the massive amount of plastics used by societies. In this context, so-called biodegradable materials emerge, with emphasis on starch-based compounds, which, although they have limited mechanical properties and low water resistance, allow the mixture with various reinforcing agents, in order to overcome the deficiencies for their application in larger scales without detracting from its focus on biodegradability. In this sense, the present study aimed to evaluate the biodegradability of a starch-based biopolymer, with the addition of different proportions of malt bagasse, this residue from the production process of beer; evaluating and monitoring parameters of the composting process of this mixture with organic solid waste. Biodegradation was determined from the visual assessment of the material, monitoring parameters such as pH, temperature, humidity and organic matter, being recorded in an electronic spreadsheet for descriptive analysis. The results obtained, when compared to the control composting unit, indicate a lower biological activity on the compost, consequently, a greater resistance to biodegradation. After three weeks of composting, it was difficult to identify the material and after four weeks, it was not possible to identify the biopolymer, indicating its biodegradation and incorporation into the substrate. It was observed that the material showed changes in its mechanical properties during composting. It is concluded that the material is totally biodegradable in all malt bagasse compositions, under composting conditions.*

Keywords: *Composting, biodegradable polymers, solid waste management, waste valorization.*

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento científico e econômico levou a uma evolução expressiva das sociedades humanas, permitindo, no último século, um crescimento exponencial da população e da expectativa de vida, acompanhados por mudanças no modo de produção e no consumo de recursos, bens e serviços pela população. A geração de resíduos sólidos também se intensificou, aumentando em quantidade e diversidade, no mundo são geradas mais de 2,3 bilhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU) por ano, com produção *per capita* de 0,74 kg por pessoa em um dia; no Brasil, esse número chega a 81,8 milhões de toneladas de RSU por ano, correspondendo a aproximadamente 3,55% do montante global, enquanto a média *per capita* gira em torno de 1,04 kg por pessoa em um dia, configurando-se como uma grande problemática do mundo moderno (Kaza *et al.*, 2018; Abrelpe, 2022).

No Brasil, um grande avanço nesse setor consiste na implantação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305, regulamentada em 2022, pelo Decreto nº 10.936 (Brasil, 2010; 2022). A PNRS diferencia conceitos como gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, e define por ordem de prioridade, a não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (Brasil, 2010).

Os materiais plásticos representam uma parcela significativa dos resíduos sólidos urbanos (RSU), gerados diariamente nas sociedades, estando presentes nas mais diversas formas. Os plásticos são considerados materiais passíveis de reciclagem, o Brasil ainda não possui índices de reciclagem apropriados (porcentagem?), sendo o quarto maior gerador de resíduos plásticos no mundo, os três maiores geradores são os Estados Unidos, China e Índia (Kaza *et al.*, 2018).

O emprego massificado de materiais plásticos nas últimas décadas, aliado a uma insuficiente destinação adequada dos resíduos sólidos em geral, oferece riscos à saúde da população e ao meio ambiente, devido à baixa degradabilidade dos plásticos e consequente fragmentação do material, agravando o problema crescente da presença de microplásticos no meio, afetando diretamente a biodiversidade, bem como a saúde humana devido a toxicidade do material, ademais, a presença de bioplásticos recentemente foi identificada em sangue humano, o poluente acessa o organismo a partir da utilização de alimentos embalados, consumo de carnes contaminadas ou até mesmo pela inalação ou ingestão de água contaminada. Tais adversidades relacionadas aos resíduos plásticos, especialmente aqueles de uso único, podem influenciar na pesquisa e no desenvolvimento de soluções mais adequadas, como, por exemplo, os materiais biodegradáveis ou biopolímeros. Nesse sentido, apesar de ainda ser um mercado em expansão, o desenvolvimento de polímeros biodegradáveis tem se apresentado como uma alternativa promissora nos últimos tempos, com estudos inovadores em um mercado em expansão, sendo realizados com foco na aplicação no setor de embalagens, com os materiais a base de amido recebendo grande protagonismo (Oksman; Skrifvars Selin, 2003; Tokiwa *et al.*, 2009; Vartiainen; Vähä-Nissi; Harlin, 2014; Valapa; Pugazhenth; Katiyar, 2016; Olivatto *Et Al.*, 2018; Chollet *et al.*, 2019; Sessini *et al.*, 2019; Botelho, 2022).

O amido é produzido amplamente por espécies vegetais verdes, sendo utilizado como principal forma de armazenamento energético, sob a forma de polissacarídeo, encontrado em elevadas concentrações em estruturas reprodutivas como grãos de cereais, apresentando baixo custo e fácil degradação pela ação de microrganismos (Muthuraj; Misra; Mohanty, 2017), quando aquecido em presença de água, possui a capacidade de

formar espumas, processo conhecido como expansão térmica, com o material resultante do processo possuindo características semelhantes a alguns plásticos (Mello; Mali, 2014; Engel; Ambrosi; Tessaro, 2019; Ferreira; Molina; Pelissari, 2020).

A fim de empregar estes materiais com foco na comercialização, na redução e posterior substituição dos materiais plásticos não biodegradáveis, deve-se buscar não apenas a biodegradabilidade, mas também propriedades mecânicas semelhantes, custos de produção acessíveis e resistência a agentes externos, principalmente à água (Luz; Cruz; Veiga, 2022).

A mistura e processamento simultâneo dos biopolímeros com diferentes tipos de materiais, tal como agentes de reforço, compatibilizadores, plastificadores, polímeros não biodegradáveis, dentre outros aditivos; são exemplos de técnicas encontradas para contornar algumas das limitações e melhorar as propriedades dos biopolímeros. Como exemplo de materiais de reforço, podendo-se citar o bagaço de cana de açúcar, bagaço de uva, casca de aspargos, e também o bagaço de malte, sendo esse um dos principais ingredientes da cerveja, a bebida alcoólica mais consumida do mundo (Mello; Vergílio; Mali, 2013; Soykeabkaew; Thanomsilp; Suwanton, 2015; Khan *et al.*, 2016; Arrieta *et al.*, 2017; Bhasney *et al.*, 2019; Cruz-Tirado *Et Al.*, 2019; Engel; Ambrosi; Tessaro, 2019; Sessini *et al.*, 2019; Ferreira; Molina; Pelissari, 2020; Oliveira; Souza; Magalhães-Guedes, 2022).

A cerveja possui significativa contribuição, direta e indireta, na economia de diversos países, ademais, o Brasil encontra-se entre os maiores produtores mundiais da bebida. No processo produtivo da cerveja, originam-se elevadas quantidades de efluentes líquidos e resíduos sólidos, necessitando de técnicas de tratamento e destinação final ambientalmente adequadas (Tschope, 2001; Kochenborger, 2012; Mathias; Mello; Servulo, 2014; Barbosa, 2019).

No processo de filtragem, ocorre a separação da fração líquida e sólida, em que o bagaço de malte corresponde ao principal resíduo sólido formado, apresentando um elevado teor de umidade, fibras e proteínas. O bagaço de malte é predominantemente fibroso e proteico, sendo considerado um composto lignocelulósico, possuindo também uma significativa capacidade nutricional. Como possível utilização, são destacados o uso como complemento alimentar para animais, o aproveitamento energético por meio da queima direta ou produção de biogás, uso como material adsorvente e meio de suporte para imobilização celular (Mussatto; Dragone; Roberto, 2006; Lima, 2010; Aliyu; Bala, 2011; Mello; Vergílio; Mali, 2013).

O processamento simultâneo de biopolímeros com agentes de reforço baseados em lignina, caso do bagaço de malte, pode ser uma interessante alternativa para melhorar as qualidades mecânicas, assim como reduzir a taxa de degradação, dos polímeros biodegradáveis, resultando em uma maior vida útil do material, porém ainda sendo possível o emprego de técnicas de tratamento, como a compostagem (Kale *et al.*, 2007; Iovino *et al.*, 2008; Fortunati *et al.*, 2014; Yang *et al.*, 2015; Valapa; Pugazhenth; Katiyar, 2016; Kalita *et al.*, 2019).

Conforme a NBR 13.591, publicada pela ABNT, a compostagem consiste no processo de decomposição biológica da matéria orgânica, em condições controladas que incluem as fases de degradação ativa e de maturação (ABNT, 1996). No processo de compostagem, a degradação aeróbia da matéria orgânica biodegradável presente no composto, ocorre devido a ação de microrganismos principalmente, bactérias, fungos e actinomicetos, que liberam dióxido de carbono e água; tendo como produto gerado, um composto estável e sanitariamente seguro, usado como adubo, possibilita a valoração agrônômica da fração orgânica dos resíduos sólidos, aumenta a vida útil dos aterros

sanitários (Kiehl, 1985; Domínguez; Edwards; Subler, 1997; Campitelli; Velasco; Ceppi, 2012).

Nesse contexto, o presente estudo, teve como objetivo avaliar a eficiência do processo de compostagem de material base para a produção de embalagens biodegradáveis, de diferentes proporções de bagaço de malte, com a incorporação de resíduos sólidos orgânicos.

MATERIAIS E MÉTODOS

Durante a fase experimental do projeto, foram montadas composteiras domésticas (Figura 1) no *Campus* de Irati da Universidade Estadual do Centro-Oeste (Unicentro), para análise dos parâmetros físico-químicos da compostagem de um material base para a produção de embalagens biodegradáveis, com a incorporação de resíduos sólidos orgânicos, realizando o acompanhamento e coleta dos parâmetros do substrato obtido durante um intervalo de 90 dias, em um processo aeróbico do material no interior das composteiras, de forma sistemática e intensiva, visando regular e estabilizar a temperatura, bem como a umidade no interior dos dispositivos, mediante intervenções manuais diárias, com objetivo de otimizar as condições ideais para o processo de decomposição do material por via aeróbica.

Figura 1. Montagem das composteiras



As análises foram definidas com base nos parâmetros de controle do processo de compostagem, segundo o Manual de métodos de análise de solos (Teixeira et al., 2017). Os autores apresentam os parâmetros necessários para avaliação do composto resultante a partir da compostagem dos materiais orgânicos, que são dispostos pela Nota Técnica do Paraná (Paraná, 2022). Porém, podem ser realizadas certas adaptações de técnicas e materiais, segundo a disponibilidade de recursos para serem realizadas as análises.

A matéria orgânica durante a compostagem sofre o processo de mineralização, diminuindo sua quantidade à medida que a degradação ocorre (Kiehl, 1998). A metodologia para determinar esse parâmetro consistiu em calcular a diferença gravimétrica da amostra seca (exposição do composto a uma temperatura de 105°C, durante 24 horas) e após incineração na mufla (550°C durante 01 hora) (Teixeira et al., 2017). A matéria orgânica foi determinada pela Equação 1.

$$MO (\%) = \frac{(Mi-tara) - (Mf-tara)}{(Mi-tara)} \times 100 \quad (1)$$

Em que a *tara* corresponde a tara do cadinho em gramas, o *Mi* corresponde a massa inicial, sendo o peso do cadinho somado ao peso da amostra em gramas após o período de 24 horas na estufa, e o *Mf* refere-se à massa final composto pelo peso do cadinho somado ao peso da amostra em gramas após uma hora na mufla.

Para determinação do pH foram realizadas medições uma vez ao dia em um potenciômetro com eletrodo imerso na mistura da amostra com água destilada (Teixeira et al., 2017). O processo de compostagem aeróbia provoca a elevação do pH, nos primeiros dias de compostagem o composto, normalmente, permanece ácido e com o passar das fases aproxima-se da neutralidade (Kiehl, 1985). A faixa ótima de pH para o composto final deve situar-se entre 7,5 e 9,0 (Pereira Neto, 2007).

É importante destacar que a temperatura é um parâmetro de grande relevância para o processo de compostagem, sendo um indicativo direto da atividade microbológica e sobre o grau de maturação do composto. A temperatura foi verificada uma vez ao dia com um termômetro em profundidade entre 10 e 20 cm. Ressalta-se que a temperatura ótima durante a compostagem deve encontrar-se entre 45°C e 65°C (Paraná, 2022).

Para o cálculo da umidade (Equação 2), foi utilizada a diferença gravimétrica entre a massa da amostra e após a sua secagem na estufa, com temperatura de 105°C, durante 24 horas. Para esse parâmetro, destaca-se que Pereira Neto (2007) indica que teores de umidade na faixa de 40 a 55% são satisfatórios para todos os processos.

$$U(\%) = \frac{(Mi-tara) - (Mf-tara)}{(Mi-tara)} \times 100 \quad (2)$$

Em que a *tara* corresponde a tara do cadinho em gramas, *Mi* refere-se à massa inicial composto pelo peso do cadinho somado ao peso da amostra em gramas e o *Mf* corresponde a massa final, sendo o peso do cadinho somado ao peso da amostra em gramas após o período de 24 horas na estufa.

O biopolímero empregado no presente trabalho foi produzido e cedido pelo grupo de pesquisa Desenvolvimento e Aplicação de Polímeros Naturais, vinculado a Universidade Estadual de Ponta Grossa. O biopolímero analisado é resultante de três diferentes proporções de amido de mandioca (material base) e bagaço de malte, este oriundo da produção de cerveja do tipo Pilsen, sendo 10%, 5% e 0% de bagaço na mistura.

Durante a etapa de preparação, foram escolhidos os recipientes e o local, sendo uma composteira comercial e uma estufa para acondicionamento destas composteiras. A grande maioria dos resíduos orgânicos verdes, restos e cascas de vegetais, foram obtidos no restaurante universitário, sediado nas dependências da Universidade Estadual do Centro-Oeste, *Campus Irati-Pr*, o restante foi oriundo de resíduos orgânicos domiciliares fragmentados manualmente, seguindo os parâmetros de tamanho de partículas com diâmetro entre 10 e 50 mm, de acordo com a Nota Técnica do Paraná para Compostagem de Resíduos Sólidos Urbanos (Paraná, 2022).

Para fins comparativos, além da unidade de compostagem que contém o biopolímero, foi empregado uma unidade adicional de controle. Para a montagem das composteiras, definiu-se as proporções dos materiais com base nas dimensões da unidade de compostagem, foi adotada a medida volumétrica, adotando o valor do volume e não da massa para realização dos cálculos, seguindo as proporções de 70% de resíduos orgânicos secos e 30% de resíduos orgânicos verdes. Para apresentar maior representatividade no processo de compostagem, definiu-se 10% como a proporção de biopolímero compondo o volume dos resíduos orgânicos verdes. Para os resíduos secos, empregou-se resíduos de poda e capina, ademais, não se empregou qualquer tipo de inoculação de microrganismos.

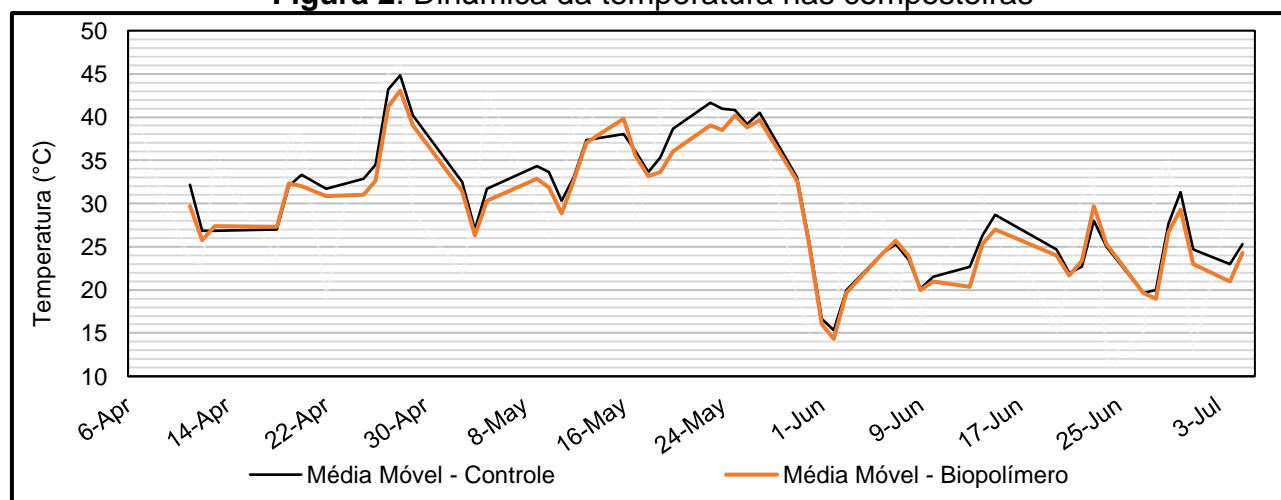
Conforme descrito por Brozio e Masek (2020) e pela Nota Técnica do Paraná (2022), a eficiência do processo de degradação depende também das dimensões do material alvo, razão pela qual os resíduos orgânicos verdes, no qual se incluem o biopolímero, foram devidamente cortados e misturados. Com a montagem das unidades de compostagem, deu-se início ao processo de compostagem. Os resultados obtidos do monitoramento das unidades de compostagem foram devidamente registrados em planilha eletrônica no software Microsoft® Excel®, para posterior análise descritiva dos dados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O processo de compostagem do material foi acompanhado por um período de 90 dias, até obtenção da estabilidade do composto conforme o decorrer da compostagem, em um período próximo a um mês, o material apresentou grande redução de seu volume, ademais, observou-se que o material apresentou tendência de formação de aglomerados com o decorrer do processo, em ambas as unidades de compostagem, sendo necessário o revolvimento contínuo e desagregação dos aglomerados, visando a biodegradação homogênea do substrato.

Devido à ausência de um sistema de controle da temperatura na estufa, parâmetros como a temperatura das unidades de compostagem ficaram suscetíveis a variação da temperatura externa. O período no qual foi realizado o processo de compostagem correspondeu a parte do Outono e Inverno, onde ocorreram recorrentes quedas nas temperaturas. Embora com temperaturas amenas, devido a características da estufa onde se encontravam as unidades de compostagem, a temperatura elevava rapidamente quando havia incidência de luz solar, resultando em uma grande amplitude térmica nas unidades de compostagem, o que pode ter influenciado na dinâmica microbológica. Para melhor representação do comportamento da temperatura, empregou-se a média móvel dos últimos três dias, visto que a análise da temperatura obtida diariamente apresenta grande variação em curtos períodos (Figura 2).

Figura 2. Dinâmica da temperatura nas composteiras

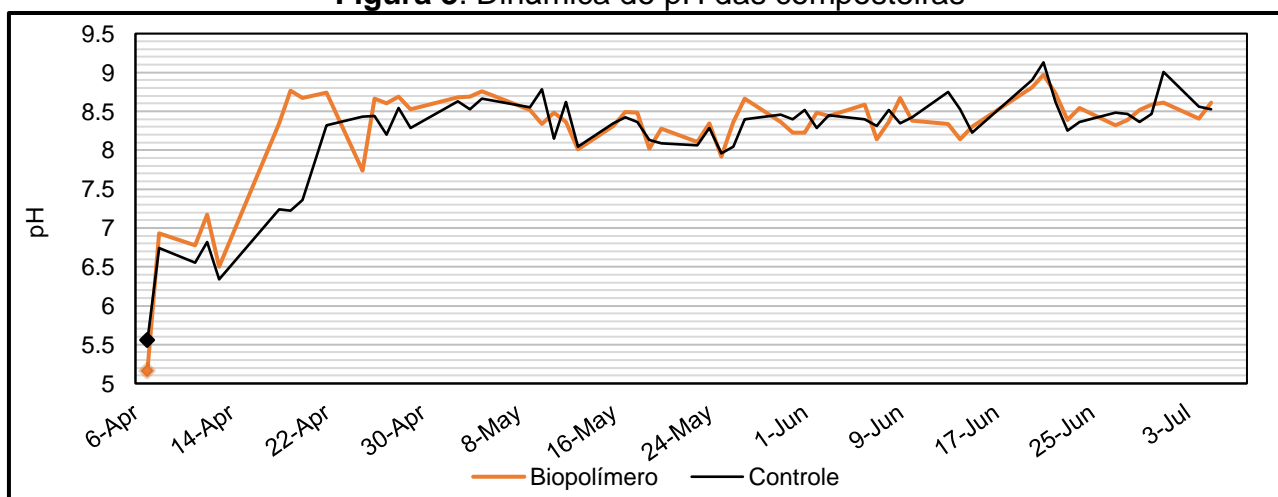


Os picos máximos de temperatura registrados foram de 46,5°C, na unidade de controle, e de 45°C, para a unidade com o biopolímero, estes ocorrendo entre 21 e 22 dias de compostagem. Para a unidade controle, o número de dias com temperatura acima ou igual 30°C foi de 31 dias (34% do período total da compostagem), com 29 dias (32%) para a unidade com o biopolímero. Para as temperaturas acima ou igual a 40°C, foram 11 dias

(12%) para a unidade controle e 9 dias (10%) para a unidade com o biopolímero. Segundo os parâmetros da Nota Técnica do Paraná, a temperatura ideal na fase de degradação ativa situa-se entre 45°C e 65°C (Paraná, 2022); porém cabe ressaltar que os valores apresentados são relacionados a leiras em pátios de compostagem, as quais apresentam maiores dimensões que, conseqüentemente, possuem maior retenção do calor gerado, e maior resistência a influência climática externa; para as composteiras domésticas, a pequena dimensão da caixa digestora torna o processo suscetível à variação de temperatura do local de estudo (Colón et al. 2010).

Outro parâmetro avaliado foi o pH que é um indicativo sobre o comportamento químico do processo de compostagem, referente a forma da atividade dos íons de hidrogênio (H⁺). Segundo Pereira Neto (2004), substratos ácidos proporcionam um maior desenvolvimento de fungos, os quais atuam na elevação do pH conforme consomem a matéria orgânica; além de ressaltarem que a faixa ideal de pH para o desenvolvimento adequado dos microrganismos é de 5,5 a 8,0. Além do referencial teórico, observou-se o desenvolvimento de hifas de fungos de coloração branca sobre ambos os substratos nas composteiras, porém em menor proporção na qual continha o biopolímero. O pH, tal como a temperatura, também apresentou certa variação nos valores, cujo comportamento dos resultados obtidos, estando representados na Figura 3.

Figura 3. Dinâmica do pH das composteiras

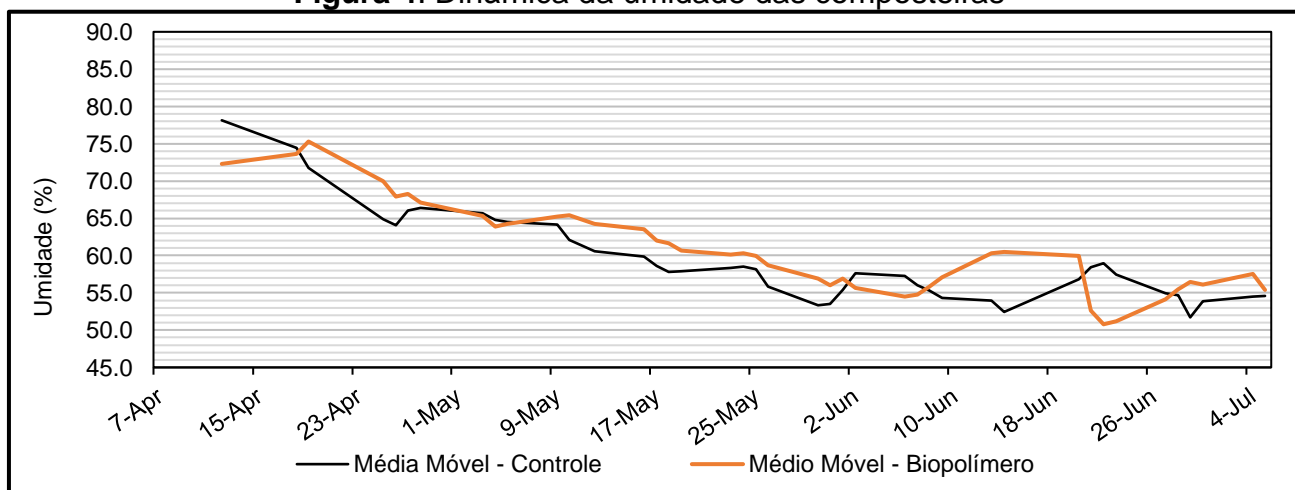


Conforme os valores obtidos no início do processo de compostagem o meio apresentava pH ácido (5,16 e 5,55 para a composteira controle e a contendo o biopolímero, respectivamente), devido a presença de ácidos orgânicos oriundos das atividades microbiológicas sobre a matéria orgânica presente, que na composteira controle estavam em maior quantidade. A partir do segundo dia da fase ativa de compostagem, a tendência foi a alcalinização do meio, evidenciada pelo aumento nos valores do pH obtidos, a qual decorreu até a terceira semana. Após este período, o pH estabilizou em uma média de 8,5 até o final do processo de compostagem, resultado que, de acordo com Jiménez e Garcia (1989) e Lacerda et al. (2020), indica a maturação do composto.

Com base nos valores referentes ao comportamento do pH, nota-se que o processo de alcalinização foi mais rápido e com maior intensidade no material sem o biopolímero, uma vez que os resíduos orgânicos frescos estavam em maior quantidade e estes são de rápida e fácil degradação, indicando que o biopolímero é mais complexo de ser degradado pelos microrganismos.

Outro parâmetro relevante no processo de compostagem corresponde à umidade, que influencia, diretamente, nas atividades microbiológicas, onde, os valores abaixo de 20% de umidade resultam na redução, ou na possível inibição da degradação da matéria orgânica. Ressalta-se que os valores mais elevados, superior a 60%, prejudicam a aeração, promovendo a formação de zonas anaeróbicas, originando odores desagradáveis (Bidone; Povinelli, 1999). Segundo Kiehl (1998), em valores de umidade abaixo de 40%, tem-se maior predominância de fungos agindo no substrato, com menor participação de bactérias. Na presente pesquisa, a evolução das umidades nas composteiras são apresentadas na Figura 4.

Figura 4. Dinâmica da umidade das composteiras



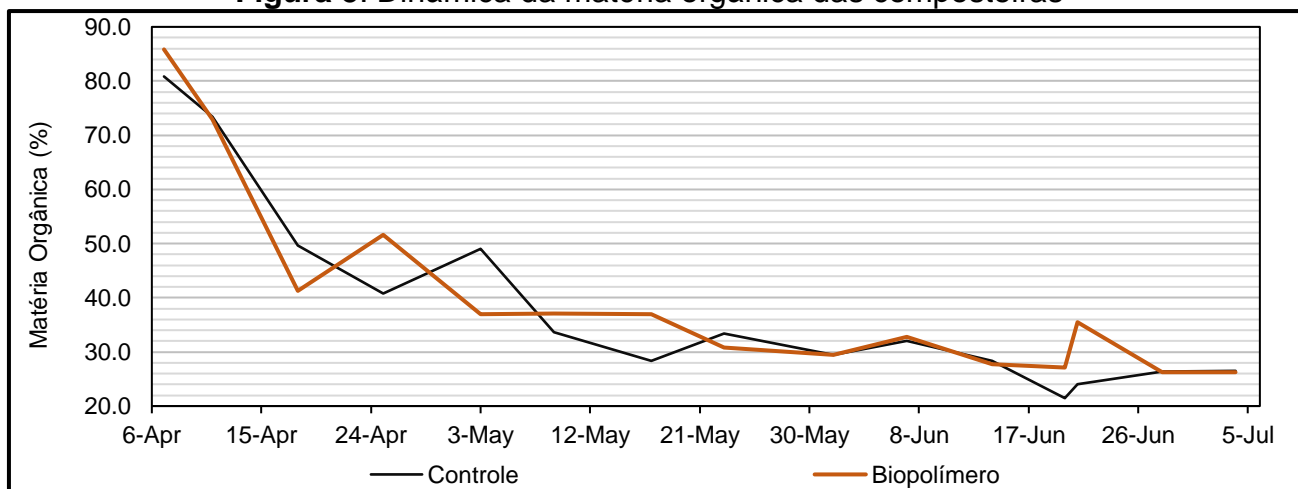
A umidade durante o processo de compostagem apresentou tendência de redução, com um breve aumento nos dias iniciais para as duas unidades de compostagem, atingindo o pico máximo de 85,05% de umidade para a unidade controle e de 84,11% para a unidade contendo o biopolímero. Devida a elevada umidade no início do processo, realizou-se diariamente o revolvimento das unidades. Ao final do processo, os valores de umidade ficaram em média próximo aos 55%. Devido as características do material, o qual apresentava baixo valor de umidade em sua composição, a umidade inicial da unidade contendo o biopolímero foi inferior a umidade da unidade controle, sendo 69,58% e 77,55%, respectivamente, sendo empregado a média móvel dos últimos três dias para melhor apresentação do comportamento dos dados obtidos.

Devido, principalmente, a variação da temperatura do meio externo, e a interação com a umidade resultante dos processos de biodegradação, no qual a matéria orgânica é convertida em energia, gás carbônico e água; notou-se a variação da umidade, com tendência de redução conforme o decorrer do processo em ambas as unidades de compostagem. Nos períodos finais da compostagem, observou-se um aumento na variação da umidade, podendo ser consequência da formação de regiões de concentrações irregulares de substrato, as quais apresentam diferentes taxas de evaporação que, quando coletadas para realização das análises, resultavam diferentes percentuais de umidade. Ao final do processo de compostagem, para ambas as unidades, o teor de umidade resultante foi de aproximadamente 55%, sendo semelhante ao valor descrito na literatura (Pereira Neto, 2007).

Na busca por avaliar a dinâmica do processo de compostagem, empregou-se a determinação da matéria orgânica presente no sistema, conforme o decorrer do processo. Para minimizar a influência da umidade, as amostras eram secas em estufa. O

comportamento dos valores da matéria orgânica no decorrer do processo de compostagem está representado na Figura 5.

Figura 5. Dinâmica da matéria orgânica das composteiras



Após um dia do início da fase ativa da compostagem, foi realizada a análise inicial da matéria orgânica, evidenciando a atuação dos microrganismos e retornando os valores iniciais de 80,85% para a unidade controle, enquanto a unidade com biopolímero apresentou 85,84% no mesmo período, tornando possível notar a maior intensidade de decomposição na unidade controle. A última análise demonstrou redução significativa em ambas as unidades, resultando em 26,55% para a unidade controle e 26,25% para a unidade com biopolímeros, essa característica do processo de compostagem evidencia a degradação e o consumo da matéria orgânica presente nas unidades, sendo convertida em energia bioquímica, gás carbônico e água, comportamento este, relatado na literatura e em demais estudos da área (Kiehl, 1998; Fonseca; Barcia; Veiga, 2021).

A adição de bagaço de malte ao material base de amido tem por objetivo a melhoria nos parâmetros físicos do material; contudo o biopolímero com adição do bagaço em ambas as proporções, 5% e 10% de bagaço de malte, mostraram-se ser mais afetado pelo contato com o meio, com relevância a elevada umidade no início dos ensaios, apresentando maior desintegração da camada externa do material. Uma das hipóteses para obtenção desse resultado pode estar relacionada a maior rugosidade, e conseqüentemente, maior área de contato do material com o meio. Já o material sem a adição do bagaço de malte, devido a interação com o meio, após uma semana de compostagem, apresentava-se com melhor maleabilidade e comportamento elástico, mas sem desprendimento de material da superfície do biopolímero.

Após três semanas, tornava-se difícil a identificação do biopolímero em todas as proporções de bagaço de malte. Na quarta semana de compostagem, não era mais possível a identificação do material alvo, percebendo-se, também, um aumento da coesividade dos resíduos, a qual se intensificou conforme o decorrer do processo.

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos a partir das análises propostas, apontam que o emprego do biopolímero no processo de compostagem, embora ligeiramente divergente, os valores encontrados assemelham-se e seguem uma tendência comum com a unidade de compostagem controle. Contudo, especialmente os parâmetros de temperatura e pH,

direcionam a uma menor atividade microbiológica e, conseqüentemente, evidenciam a maior complexidade de biodegradação dos materiais testados, entretanto, ainda que a atividade microbiológica tenha se apresentado menor em comparação a unidade de controle, observou-se a completa degradação do material inserido ao meio compostável.

Destaca-se que esse estudo apresenta informações relevantes alinhadas ao princípio do desenvolvimento sustentável, previsto na Política Nacional de Resíduos Sólidos, sendo que todo município deveria prever em seus Planos Municipais de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos, técnicas que promovessem a realização de compostagem, em níveis domiciliares e municipais, a fim de impulsionar a valorização dos resíduos, considerando que grande parte dos resíduos gerados pelos municípios são resíduos orgânicos, e muitos deles são encaminhados à coleta municipal misturados com biopolímeros.

Nesse contexto, o presente estudo trouxe resultados que remetem a algumas reflexões, porém a determinação das características mecânicas do material, no decorrer do processo de compostagem, acompanhando o efeito da degradação biológica nas diferentes composições, sugere-se a realização de novos estudos mais aprofundados sobre esta dinâmica. A análise das propriedades mecânicas e da degradação biológica na compostagem, com uma visão holística e integrada para Gestão dos resíduos, convergem para a busca da sustentabilidade, impulsionando esforços globais para um futuro mais equilibrado e saudável.

AGRADECIMENTOS

À Fundação Araucária, pelo apoio financeiro, pela bolsa concedida para realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais.

Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2021/2022. São Paulo, 2022.

ALIYU, S.; BALA, M. Brewer's spent grain: a review of its potentials and applications. **African Journal Of Biotechnology**, v. 10, n. 3, p. 324-331, 2011.

ARRIETA, M.; SAMPER, M.; ALDAS, M.; LÓPEZ, J. On the Use of PLA-PHB Blends for Sustainable Food Packaging Applications. **Materials**, v. 10, n. 9, p. 1008, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma10091008>.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 13.591: Compostagem - Terminologia.** Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

BARBOSA, L. A. A. **Caracterização e análise do processo de tratamento de efluente de cervejaria para potencial reúso - comparação entre uma indústria de grande porte e uma cervejaria artesanal.** 2019. 81 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2019.

BHASNEY, S. M.; BHAGABATI, P.; KUMAR, A.; KATIYAR, V. Morphology and crystalline characteristics of polylactic acid [PLA]/linear low density polyethylene [LLDPE]/microcrystalline

cellulose [MCC] fiber composite. **Composites Science And Technology**, v. 171, n. 1, p. 54-61, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.11.028>.

BIDONE, F. R. A.; POVINELLI, J. **Conceitos básicos de resíduos sólidos**. São Carlos: EESC/USP, 1999.

BOTELHO, V. **Microplásticos da poluição podem contaminar o sangue por meio da alimentação e respiração**. *Jornal da USP*, 2022. Disponível em: <https://jornal.usp.br/atualidades/microplasticos-da-poluicao-podem-contami-nar-o-sangue-por-meio-da-alimentacao-e-respiracao/>. Acesso em: 22 mai. 2024.

BRASIL. Lei n. 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, p. 3, 03 ago. 2010.

BRASIL. Decreto n. 10.936, de 12 de janeiro de 2022. Regulamenta a Lei n. 12.305, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, p. 2, 12 jan. 2022.

BROZIO, M. L.; MASEK, A. The Effect of Natural Additives on the Composting Properties of Aliphatic Polyesters. **Polymers**, v. 12, n. 9, p. 1856, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym12091856>.

CAMPITELLI, P.; VELASCO, M.; CEPPI, S. Characterization of humic acids derived from rabbit manure treated by composting-vermicomposting process. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v.12, n.4, p. 875-891, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162012005000039>.

CHOLLET, B.; CUESTA, J. M. L.; LAOUTID, F.; FERRY, L. Lignin Nanoparticles as A Promising Way for Enhancing Lignin Flame Retardant Effect in Polylactide. **Materials**, v. 12, n. 13, p. 2132, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390%2Fma12132132>.

COLÓN, J; MARTÍNEZ-BLANCO, J; GABARRELL, X; ARTOLA, A; SÁNCHEZ, A; RIERADEVALL, J. *et al.* Environmental assessment of home composting, **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, n.11, p. 893-904, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.01.008>.

CRUZ-TIRADO, J. P.; VEJARANO, R.; TAPIA-BLÁCIDO, D. R.; ANGELATS-SILVA, L. M.; SICHE, R. The addition of sugarcane bagasse and asparagus peel enhances the properties of sweet potato starch foams. **Packaging Technology and Science**, v. 32, n. 5, p. 227-237, 2019. DOI : <http://dx.doi.org/10.1002/pts.2429>.

DOMÍNGUEZ, J.; EDWARDS, C.A.; SUBLER, S. A comparison of composting and vermicomposting. **Biocycle**, v.38, n.4, p.57-59, 1997.

ENGEL, J. B.; AMBROSI, A.; TESSARO, I. C. Development of biodegradable starch-based foams incorporated with grape stalks for food packaging. **Carbohydrate Polymers**, v. 225, n.1, p. 115234, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115234>.

FERREIRA, D. C. M.; MOLINA, G.; PELISSARI, F. M. Biodegradable trays based on cassava starch blended with agroindustrial residues. **Composites Part B: Engineering**, v. 183, p. 107682, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107682>.

FONSECA, S.; BARCIA, M. K.; VEIGA, T. B. Avaliação dos parâmetros de processos de compostagem/ vermicompostagem para resíduos orgânicos com inserção de embalagens oxibiodegradáveis. **Revista Científica ANAP Brasil**, v. 14, n. 35, 2021. DOI: <https://doi.org/10.17271/19843240143520212929>.

FORTUNATI, E.; RINALDI, S.; PELTZER, M.; BLOISE, N.; VISAI, L.; ARMENTANO, I. *et al.* Nano-biocomposite films with modified cellulose nanocrystals and synthesized silver nanoparticles. **Carbohydrate Polymers**, v. 101, n. 1, p. 1122-1133, 2014. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.10.055>.

IOVINO, R.; ZULLO, R.; RAO, M. A.; CASSAR, L.; GIANFREDA, L. Biodegradation of poly(lactic acid)/starch/coir biocomposites under controlled composting conditions. **Polymer Degradation And Stability**, v. 93, n. 1, p. 147-157, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2007.10.011>.

JIMÉNEZ, E. I.; GARCIA, V. P. Evaluation of city refuse compost maturity: a review. **Biological Wastes**, v. 27, n. 2, p. 115-142, 1989. DOI : [https://doi.org/10.1016/0269-7483\(89\)90039-6](https://doi.org/10.1016/0269-7483(89)90039-6).

KALE, G.; AURAS, R.; SINGH, S. P.; NARAYAN, R. Biodegradability of polylactide bottles in real and simulated composting conditions. **Polymer Testing**, v. 26, n. 8, p. 1049-1061, 2007. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2007.07.006>.

KALITA, N. K.; NAGAR, M. K.; MUDENUR, C.; KALAMDHAD, A.; KATIYAR, V. Biodegradation of modified Poly(lactic acid) based biocomposite films under thermophilic composting conditions. **Polymer Testing**, v. 76, n. 1, p. 522-536, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.02.021>.

KAZA, S.; YAO, L.; BHADA-TATA, P.; WOERDEN, V. F. **What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050**. Washington: World Bank, 2018. Disponível em: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>. Acesso em: 05 ago. 2022.

KHAN, B.; NIAZI, M. B. K.; SAMIN, G.; JAHAN, Z. Thermoplastic Starch: a possible biodegradable food packaging material-a review. **Journal Of Food Process Engineering**, v. 40, n. 3, p. 12447-12447, 2016. DOI : <https://doi.org/10.1111/jfpe.12447>.

KIEHL, E.J. **Fertilizantes orgânicos**. Piracicaba: Editora Agronômica Ceres, 1985.

KIEHL, E.J. **Manual da Compostagem: Maturação e Qualidade do Composto**. 4. ed. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1998.

KOCHENBORGER, G. **Tratamento físico-químico para efluente de cervejaria**. 2012. 41 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, RS, 2012.

LACERDA, K. A. P.; MORAES, J. V. Q.; SILVA, Y. G.; OLIVEIRA, S. L. Compostagem: alternativa de aproveitamento dos resíduos sólidos utilizando diferentes modelos de composteiras. **Brazilian Journal Of Development**, v. 6, n. 6, p. 40753-40763, 2020. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n6-567>.

LIMA, U. A. **Matérias-primas dos Alimentos**. São Paulo: Blücher, 2010. 402 p.

LUZ, M. V.; CRUZ, C. C. B.; VEIGA, T. B. Identificação e avaliação de fatores determinantes do processo de compostagem de materiais biodegradáveis: uma revisão sistemática. **Revista Científica ANAP Brasil**, v. 15, n. 36, 2022. DOI: <https://doi.org/10.17271/19843240153620223364>.

MATHIAS, T. R. S.; MELLO, P. P. M.; SERVULO, E. F. C. Caracterização de resíduos cervejeiros. *In: XX Congresso Brasileiro De Engenharia Química*. Florianópolis, Santa Catarina, 2014.

MELLO, L. R. P. F.; MALI, S. Use of malt bagasse to produce biodegradable baked foams made from cassava starch. **Industrial Crops and Products**, v. 55, p. 187–193, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.02.015>.

MELLO, L. R. P. F.; VERGÍLIO, R. M.; MALI, S. Caracterização Química e Funcional do Resíduo Fibroso da Indústria Cervejeira. **Biochemistry and Biotechnology Reports**, v. 2, n. esp (2013): Anais do III Simpósio de Bioquímica e Biotecnologia 2013, p. 191-194, 2013. DOI: <https://doi.org/10.5433/2316-5200.2013v2n3espp191>.

MUSSATTO, S.I.; DRAGONE, G.; ROBERTO, I.C. Brewers' spent grain: generation, characteristics and potential applications. **Journal Of Cereal Science** v. 43, n. 1, p. 1-14, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2005.06.001>.

MUTHURAJ, R.; MISRA, M.; MOHANTY, A. K. Biodegradable compatibilized polymer blends for packaging applications: a literature review. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 135, n. 24, p. 45726, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.45726>.

OKSMAN, K.; SKRIFVARS, M.; SELIN, J. F. Natural fibres as reinforcement in polylactic acid (PLA) composites. **Composites Science and Technology**, v. 63, n. 9, p. 1317–1324, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00103-9](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00103-9).

OLIVATTO, G. P.; CARREIRA, R.; TORNISIELO, V. L.; MONTAGNER, C. C. Microplásticos: Contaminantes de Preocupação Global no Antropoceno. **Revista Virtual de Química**, v. 10, n. 6, p. 1968-1989, 2018. DOI: <https://doi.org/10.21577/1984-6835.20180125>.

OLIVEIRA, C. R.; SOUZA, C. O.; MAGALHÃES-GUEDES, K. T. Compostos antioxidante presentes na cerveja e sua relação com a saúde humana. *In: CORDEIRO, C. A. M.; EVANGELISTA-BARRETO, N. S.; SANCHES, A. G. (org.). Ciência e tecnologia de alimentos: o avanço da ciência no Brasil*. Guarujá-SP: Científica Digital, 2022. cap. 6, p 70-85.

PARANÁ (Estado). Ministério Público do Estado do Paraná. Centro de Apoio Operacional às Promotorias de Proteção ao Meio Ambiente. **Nota Técnica: Compostagem de Resíduos Sólidos Urbanos**. Disponível em: https://www.mpma.mp.br/arquivos/ESMP/Nota_Tecnica_-_Compostagem.pdf. Acesso em: 05 ago. 2022.

PEREIRA NETO, J. T. Compostagem: Fundamentos e métodos. *In: I Simpósio sobre compostagem: ciência e tecnologia*. Botucatu, São Paulo, 2004.

PEREIRA NETO, J. T. **Manual de Compostagem**: processo de baixo custo. Viçosa: UFV, 2007.

SESSINI, V.; ARRIETA, M. P.; RAQUEZ, J. M.; DUBOIS, P.; KENNY, J. M.; PEPONI, L. Thermal and composting degradation of EVA/Thermoplastic starch blends and their nanocomposites. **Polymer Degradation And Stability**, v. 159, p. 184-198, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2018.11.025>.

SOYKEABKAEW, N.; THANOMSILP, C.; SUWANTONG, O. A review: Starch-based composite foams. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 78, p. 246-263, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.08.014>.

TEIXEIRA, P. C. DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017

TOKIWA, Y.; CALABIA, B.; UGWU, C.; AIBA, S. Biodegradability of Plastics. **International Journal Of Molecular Sciences**, v. 10, n. 9, p. 3722-3742, 2009. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms10093722>.

TSCHOPE, E. C. **Microcervejarias e cervejarias**: a história, a arte e a tecnologia. São Paulo: Aden, 2001.

VALAPA, R.; PUGAZHENTHI, G.; KATIYAR, V. Hydrolytic degradation behaviour of sucrose palmitate reinforced poly(lactic acid) nanocomposites. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 89, p. 70–80, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.04.040>.

VARTIAINEN, J.; VÄHÄ-NISSI, M.; HARLIN, A. Biopolymer Films and Coatings in Packaging Applications - A Review of Recent Developments. **Materials Sciences and Applications**, v. 05, n. 10, p. 708–718, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.4236/msa.2014.510072>.

YANG, W.; FORTUNATI, E.; DOMINICI, F.; KENNY, J. M.; PUGLIA, D. Effect of processing conditions and lignin content on thermal, mechanical and degradative behavior of lignin nanoparticles/polylactic (acid) bionanocomposites prepared by melt extrusion and solvent casting. **European Polymer Journal**, v. 71, n. 1, p. 126-139, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2015.07.051>.

Recebido em: 14/09/2023

Aprovado em: 29/12/2023