

RESSALVA

Atendendo solicitação da autora, o texto completo desta tese será disponibilizado somente a partir de 30/04/2023.



PROGRAMA INTEGRADO (UNESP, USP E UNICAMP) DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM BIOENERGIA

PRODUÇÃO DE POLIHIDROXIALCANOATOS POR
Burkholderia glumae MA13:
UM CONCEITO ASSOCIADO À INDÚSTRIA DE BIOCOMBUSTÍVEIS

CAROLINA BILIA CHIMELLO DE-PAULA

CAROLINA BILIA CHIMELLO DE-PAULA

PRODUÇÃO DE POLIHIDROXIALCANOATOS POR
Burkholderia glumae MA13:
UM CONCEITO ASSOCIADO À INDÚSTRIA DE BIOCOMBUSTÍVEIS

Tese apresentada ao Instituto de Pesquisa em Bioenergia de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. Jonas Contiero

Coorientador: Prof. Dr. Fabrício Coutinho de Paula Elias

Rio Claro - SP

2021

D278p de-Paula, Carolina Bilia Chimello
Produção de polihidroxicanoatos por *Burkholderia glumae* MA13
: um conceito associado à indústria de biocombustíveis / Carolina
Bilia Chimello de-Paula. -- Rio Claro, 2021
266 f. : il., tabs.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Instituto de Pesquisa em Bioenergia, Rio Claro
Orientador: Jonas Contiero
Coorientador: Fabrício Coutinho de Paula Elias

1. Energia. 2. Biomassa. 3. Biopolímeros. 4. Plásticos
biodegradáveis. 5. Biocombustíveis. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de
Pesquisa em Bioenergia, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

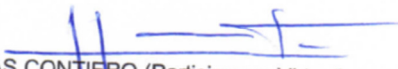
Essa ficha não pode ser modificada.


CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

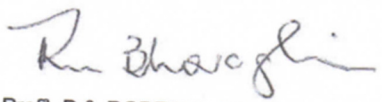
Título: PRODUÇÃO DE POLIHIDROXIALCANOATOS POR BURKHOLDERIA GLUMAE M13: UM CONCEITO ASSOCIADO À INDÚSTRIA DE BIOCOMBUSTÍVEIS

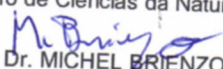
AUTORA: CAROLINA BILIA CHIMELLO DE PAULA
ORIENTADOR: JONAS CONTIERO

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em BIOENERGIA, pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. JONAS CONTIERO (Participação Virtual)
Departamento de Biologia Geral e Aplicada / IB Rio Claro


Prof. Dr. ANTONIO SAMPAIO BAPTISTA (Participação Virtual)
Departamento de Agroindústria Alimentos e Nutrição / Escola Superior de Agricultura Luís de Queiroz (ESALQ)


Prof. Dr. ROBERTA BARROS LOVAGLIO (Participação Virtual)
Centro de Ciências da Natureza / Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) - Câmpus Lagoa do Sino


Prof. Dr. MICHEL BRIENZO (Participação Virtual)
Laboratório de Caracterização de Biomassa / Instituto de Pesquisa em Bioenergia de Rio Claro - UNESP


Prof. Dr. LUIS HENRIQUE SOUZA GUIMARÃES (Participação Virtual)
Departamento de Biologia / Faculdade de Filosofia Ciências e Letras - USP - Ribeirão Preto

Rio Claro, 30 de abril de 2021.

Título corrigido: Produção de Polihidroxialcanoatos por Burkholderia glumae MA13: um conceito associado à indústria de biocombustíveis

À minha família:

Meu marido e companheiro,

Fabício

e ao nosso filho,

Heitor di Maria Miguel.

Obrigada por tanto!

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus, por sempre abençoar a minha vida e ter me sustentado todas as vezes que fraquejei.

Agradeço ao meu filho, Heitor, meu milagre de Deus, que no meio da jornada chegou de mansinho, mostrando que sou mais forte do que imaginava e diariamente tem me dado forças para ser uma pessoa melhor.

À minha mãe, Magaly, que me deu a vida por duas vezes e, mesmo não estando mais entre nós, eu sei que lá de cima torce pela minha felicidade. Você faz muita falta, te amarei eternamente!

Ao meu pai Ronaldo, que nunca mediu esforços para dar tudo o que podia à nossa família e nesses últimos anos tem sido mãe e pai, sempre disposto a nos ajudar. Te amo e obrigada por tudo, sempre!

Ao meu irmão Teco e à minha cunhada Jordana, por todas as orações e apoio quando sempre precisei, e pelo maior presente que está por vir, nossa tão amada Mel.

Aos meus sogros, Sebastiana e Elias, meus cunhados, Lara e Vinícius, por todo amor e apoio que sempre tiveram comigo e com minha família. Obrigada por tanto, amo vocês!

Ao professor Jonas, meu orientador, que me estendeu a mão quando mais precisei, me dando a grande oportunidade de trabalhar em seu laboratório, e também por todos os ensinamentos diários. Muito obrigada!

Ao Programa Integrado de Pós-Graduação em Bioenergia, a todos os professores, colaboradores e coordenação do programa, obrigada pelos ensinamentos e por toda a disponibilidade.

À Marcela, minha companheira de grupo e bancada de laboratório, por toda dedicação, carinho e disponibilidade, por se sacrificar em meio a pandemia para nos ajudar com os experimentos finais, pelas risadas de desespero quando não sabíamos o que fazer para gerar um “report” no GC-MS (que sufoco...rs), pelos longos dias de metanólise (fico cansada só de pensar...rs), pelas noites de pizza no lab, pelos lanches rápidos, enquanto tínhamos um intervalo entre um experimento e outro, pelos almoços no RU, pela amizade. Enfim, obrigada por tudo mesmo!

À Luciana, que tão gentilmente disponibilizou seu tempo para me ajudar com o HPLC e tantos ensinamentos de laboratório. Muito obrigada!

Aos colegas de laboratório, Guilherme, Vinícius, Sabrina, Ana Maria, Rafaela, Cinthia, João Rafael, Raphael, Matheus e Larissa pela amizade, ajuda e risadas que tivemos nesse tempo todo, dentro e fora do laboratório.

Ao Adriano Uemura, que nos ajudou com as análises de FTIR e também sempre me socorria com alguma dúvida relacionada ao GC-MS, e claro, pela sua amizade. Obrigada!

Ao Prof. Dr. Rodrigo Fernando Costa Marques e ao Rodolfo Debone Piazza (IQ-UNESP) pela ajuda com as análises de DSC, TGA e SLS.

Ao Prof. Dr. Alex Fernando de Almeida (UFT) pela ajuda com as análises de lipase.

Ao Moreira, da empresa Aboissa, localizada em São Paulo, que fez a doação das amostras de óleos para que eu pudesse realizar meus experimentos. Muito obrigada!

À usina Continetal, localizada em Colômbia/SP, que me cedeu as amostras de bagaço de cana de açúcar e vinhaça. Obrigada!

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Agradecimento Especial

Agradeço imensamente ao meu esposo, Fabrício, meu melhor amigo, pai do nosso filho tão desejado, meu companheiro de vida e de laboratório. Ele, que me ajudou em todos os momentos do meu doutorado, ensinando, guiando, puxando minha orelha e mostrando a importância do estudo e dedicação para se tornar um bom pesquisador. Ele ensinou muito do que sei de laboratório e de PHAs. Ele, que está ao meu lado nas horas boas e ruins (e quantos perrengues), ele que faz de tudo pela nossa família e que nunca deixou a peteca cair, nem nos momentos de maior tempestade. Gratidão eterna por tudo! Amo você infinito!

Muito obrigada!

*‘Eu sou aquela mulher a quem o tempo muito ensinou.
Ensinou a amar a vida e não desistir da luta,
recomeçar na derrota,
renunciar as palavras e pensamentos negativos’.*
(Cora Coralina)

RESUMO

Os polihidroxicanoatos (PHAs) são poliésteres microbianos sintetizados como grânulos intracelulares por representantes dos domínios Bacteria e Archaea. Os PHAs são uma família de bioplásticos de origem biológica, totalmente biodegradáveis e compostáveis, gerando um solo rico em húmus, além de ser biocompatíveis, característica atrativa para aplicações médicas e farmacêuticas. Os PHAs também atendem a especificações padrão para degradação em ambientes marinhos. Dessa forma, os PHAs são candidatos promissores para aplicações em produtos descartáveis ou de curta vida de uso. Um conceito de biorrefinaria para biocombustíveis e bioplásticos tem sido proposto por vários autores como um processo integrado, com o objetivo de viabilizar ambas as indústrias como uma cadeia produtiva parcialmente ou totalmente independente dos derivados do petróleo. Neste contexto, *Burkholderia glumae* MA13 foi capaz de sintetizar PHAs a partir de fontes de carbono e subprodutos relacionados à indústria de biocombustíveis: sacarose; xilose; melão, vinhaça e hidrolisado de bagaço de cana-de-açúcar; óleos de palma, babaçu, mamona e residual de fritura; e sebo bovino. Além disso, a produção de PHAs foi avaliada utilizando diferentes fontes de nitrogênio: $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_3$, NH_4Cl , NaNO_3 , NH_4NO_3 , ureia, extrato de levedura, autolisado de levedura e levedura seca inativa. Entre os insumos da indústria sucroalcooleira, o melão sem pré-tratamento foi a melhor fonte de carbono, mesmo comparado à sacarose pura, com valores de acúmulo intracelular de polímero de 41-47% (m/m) da massa seca celular (% MSC). A adição de 25% (v/v) de vinhaça de cana-de-açúcar ao meio de cultivo contendo melão resultou em valores de acúmulo de polímero de 45% MSC e um rendimento de 0,18 g/g, o que é econômico e ecologicamente interessante para a economia de água tratada para os processos industriais, além de oferecer um uso reciclado para a vinhaça, ao invés do descarte inapropriado deste subproduto em corpos de água e no solo. A produção de PHAs a partir de insumos relacionados à indústria de biodiesel resultou em um acúmulo intracelular máximo de polímero de 85% MSC a partir de óleo de palma. A produtividade volumétrica máxima de 0,16 g/(L.h) também foi obtida a partir deste insumo adicionado de uréia, após 56 h. A adição de ácido propiônico aos meios de cultivo resultou no copolímero P(3HB-co-3HV) com 18 e 21 mol% de 3HV em meios contendo óleo de babaçu e mamona, respectivamente. A atividade lipolítica foi detectada nos cultivos com insumos da indústria de biodiesel atingindo um valor máximo de 481 U/mL. A análise por espalhamento de luz estático (SLS) apresentou polímeros com massas moleculares médias variando de $1,3 \times 10^5$ a $2,7 \times 10^5$ Da. A calorimetria exploratória diferencial (DSC) revelou polímeros com temperaturas de fusão em uma faixa de 147-165°C, e a análise termogravimétrica (TGA) mostrou temperaturas iniciais de degradação térmica de 230-297 °C. Neste estudo, *B. glumae* MA13 demonstrou ser uma linhagem bacteriana promissora para a síntese de PHAs a partir de diferentes insumos relacionados à indústria de biocombustíveis, favorecendo um conceito de biorrefinaria com bioprodutos agregados à cadeia de produção de biocombustíveis, com benefícios ecológicos em um modelo sustentável.

Palavras-chave: PHA. Bioplástico. Biodiesel. Bioetanol. Sustentabilidade.

ABSTRACT

Polyhydroxyalkanoates (PHAs) are microbial polyesters synthesized by representatives of Bacteria and Archaea domains as intracellular granules. Beyond microbial adaptation strategies, PHAs are a family of bioplastics which are fully bio-based and biodegradable. Additionally, PHAs are compostable resulting in humus-rich soil and these microbial polymers also are biocompatible, which is attractive for pharmaceutical and medical applications such as nanobeads for drug delivery systems and nanofiber scaffolds for tissue engineering. Furthermore, PHAs meet the standard specification for marine degradability. All these mentioned features make PHAs promising candidates for short-lived and disposable applications. A biorefinery concept for biofuels and bioplastics has been proposed by many authors as an associated production set in order to generate value-added chemicals, especially those obtained from common feedstocks or biofuel byproducts, in order to support such industries as production set partially or totally independent of petrochemical derivatives. In this sense, *Burkholderia glumae* MA13 was able to synthesize PHA bioplastics from carbon sources and industrial byproducts related to biofuel industries: sucrose; xylose; sugarcane molasses, vinasse and bagasse hydrolysate; palm, babassu, castor and waste cooking oils; and bovine tallow. Moreover, PHA production was tested using different nitrogen sources: $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_3$, NH_4Cl , NaNO_3 , NH_4NO_3 , urea, yeast extract, yeast autolysate and inactivated dry yeast. Among bioethanol related feedstocks, molasses free of pre-treatment was the best carbon source, even compared with pure sucrose, with intracellular polymer accumulation values of 41-47% (w/w) cell dry weight (% CDW). The addition of 25% (v/v) sugarcane vinasse to the culture media containing molasses was not deleterious and resulted in a statistically similar maximum polymer content of 45% CDW and a polymer yield of 0.18 g/g, which is economic and ecologically interesting to save water required for industrial processes and to offer a fermentative recycling for vinasse, as an alternative to its inappropriate disposal in water bodies and soil contamination. PHA production from biodiesel related feedstocks resulted in a maximum intracellular polymer accumulation of 85% CDW from palm oil. Maximum volumetric productivity of 0.16 g/(L.h) was also obtained from palm oil and urea after 56 h. Addition of propionic acid to the culture media resulted in the copolymer P(3HB-co-3HV) with a 3HV content of 18 and 21 mol% in cultivation media containing babassu and castor oils, respectively. Lipase activity was detected in biodiesel feedstock cultivations with a maximum value of 481 U/mL. Static light scattering analysis showed average molecular weight values of polymers synthesized by *B. glumae* MA13 ranging from $1,3 \times 10^5$ to $2,7 \times 10^5$ Da. Differential scanning calorimetry (DSC) analysis revealed polymers with melting temperatures in the range of 147-165 °C, and thermogravimetric analysis (TGA) showed onset decomposition temperatures of 230-297 °C. *B. glumae* MA13 has been demonstrated to be a promising bacterial strain to synthesize PHA bioplastics from different biofuel related feedstocks and corroborates to support a biorefinery concept with value-added green chemicals for biofuel productive chain with additional ecologic benefits into a sustainable model.

Keywords: PHA. Bioplastic. Biodiesel. Bioethanol. Sustainability.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	14
OBJETIVOS	18
CAPÍTULO 01 - PRODUÇÃO ASSOCIADA DE POLIHIDROXIALCANOATOS E BIOCOMBUSTÍVEIS: UMA ALTERNATIVA SUSTENTÁVEL PARA PLÁSTICOS E COMBUSTÍVEIS DERIVADOS DO PETRÓLEO	19
1.1 Introdução.....	19
1.2 Biocombustíveis: uma abordagem introdutória	22
1.3 Bioplásticos: plásticos de origem biológica e/ou biodegradáveis.....	27
1.4 Biocombustíveis e bioplásticos em um ciclo econômico sustentável.....	30
1.5 Polihidroxicanoatos (PHAs): polímeros microbianos altamente biodegradáveis	32
1.5.1 Os PHAs são classificados de acordo com sua estrutura química.....	32
1.5.2 A síntese de PHAs tem como base três vias metabólicas	37
1.5.3 Matérias-primas sustentáveis para a produção de PHAs	41
1.5.4 PHAs são promissores para diversas aplicações.....	44
1.6 Considerações finais em direção a um futuro sustentável.....	51
CAPÍTULO 02 - PRODUÇÃO DE POLIHIDROXIALCANOATOS POR <i>Burkholderia glumae</i> EM UM CONCEITO SUSTENTÁVEL DE BIORREFINARIA DE CANA-DE-AÇÚCAR.....	54
2.1 Introdução.....	54
2.2 Material e Métodos.....	57
2.2.1 Microrganismo	57
2.2.2 Meios de cultivo.....	57
2.2.2.1 Caldo lisogênico (LB)	57
2.2.2.2 Meio mineral (MM).....	58
2.2.3 Fontes de carbono e nitrogênio.....	59
2.2.4 Esterilização.....	59

2.2.5	Cultivos de <i>Burkholderia glumae</i> MA13.....	60
2.2.5.1	Testes de assimilação de fontes de carbono relacionadas a biorrefinaria de cana-de-açúcar.....	60
2.2.5.2	Cultivos de produção de PHAs	60
2.2.6	Determinação da biomassa	61
2.2.7	Determinação das fontes de carbono	62
2.2.8	Análise de PHAs	62
2.2.8.1	Determinação de PHAs por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massa (GC-MS)	62
2.2.8.2	Análise de PHAs por espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR).....	65
2.3	Resultados e Discussão	65
2.3.1	Testes de assimilação de fontes de carbono puras e subprodutos relacionados à biorrefinarias de biocombustíveis.....	65
2.3.2	Produção de PHAs a partir de fontes de carbono puras e subprodutos relacionados a biorrefinarias de biocombustíveis.....	70
2.3.3	Influência do pH, temperatura e fontes de nitrogênio na síntese de PHAs.....	77
2.3.4	Melaço e vinhaça de cana-de-açúcar como insumos de cultivo sustentáveis.....	90
2.3.5	Análise de PHAs por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massa (GC-MS) e espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) ...	96
2.4	Conclusões	99

CAPÍTULO 03 - PRODUÇÃO DE POLIHIDROXIALCANOATOS POR *Burkholderia glumae* A PARTIR DE ÓLEO DE PALMA E BABAÇU

3.1	Introdução.....	100
3.2	Material e Métodos.....	103
3.2.1	Microrganismo	103
3.2.2	Meios de cultivo.....	103
3.2.2.1	Caldo lisogênico (LB)	103
3.2.2.2	Meio mineral (MM).....	104

3.2.3	Fontes de carbono e nitrogênio	105
3.2.4	Esterilização	105
3.2.5	Cultivos de produção de PHAs por <i>Burkholderia glumae</i> MA13	105
3.2.5.1	Cultivos de produção de PHAs em frascos agitados	105
3.2.5.2	Cultivos de produção de PHAs em biorreatores de bancada.....	106
3.2.6	Determinação da biomassa	107
3.2.7	Determinação das fontes de carbono	107
3.2.8	Determinação da atividade de lipase.....	107
3.2.9	Análise de PHAs	108
3.2.9.1	Determinação de PHAs por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massa (GC-MS)	108
3.2.9.2	Extração do polímero de <i>B. glumae</i> MA13	109
3.2.9.3	Análise de PHAs por espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR).....	109
3.2.9.4	Análise da massa molecular dos polímeros produzidos por <i>B. glumae</i> MA13 através de espalhamento estático de luz (SLS).....	109
3.2.9.5	Análise termogravimétrica dos polímeros produzidos por <i>B. glumae</i> MA13 (TGA).....	110
3.2.9.6	Análise dos polímeros produzidos por <i>B. glumae</i> MA13 por calorimetria exploratória diferencial (DSC)	110
3.3	Resultados e Discussão	111
3.3.1	Cultivos de produção de PHAs por <i>B. glumae</i> MA13 em frascos agitados .	111
3.3.1.1	Produção de PHAs a partir de óleo de palma e babaçu em diferentes temperaturas.....	111
3.3.1.2	Produção de PHAs a partir de óleo de palma e babaçu em diferentes concentrações de NaCl.....	119
3.3.1.3	Influência de diferentes concentrações de óleo de palma e babaçu sobre a produção de PHAs.....	127
3.3.1.4	Produção de PHAs a partir de óleo de palma e babaçu utilizando diferentes fontes de nitrogênio.....	135
3.3.2	Cultivos de produção de PHAs por <i>B. glumae</i> MA13 em biorreatores	143
3.3.3	Análise do polímero produzido por <i>B. glumae</i> MA13 a partir de óleo de palma e babaçu	153
3.4	Conclusões	160

CAPÍTULO 04 - PRODUÇÃO DE POLIHIDROXIALCANOATOS POR <i>Burkholderia glumae</i> A PARTIR DE ÓLEO RESIDUAL DE FRITURA, ÓLEO DE MAMONA E SEBO BOVINO	161
4.1 Introdução.....	161
4.2 Material e Métodos.....	164
4.2.1 Microrganismo.....	164
4.2.2 Meios de cultivo.....	165
4.2.2.1 Caldo lisogênico (LB)	165
4.2.2.2 Meio mineral (MM).....	165
4.2.3 Fontes de carbono e nitrogênio	166
4.2.4 Cultivos de produção de PHAs utilizando óleo de mamona, sebo bovino e óleo residual de fritura.....	167
4.2.4.1 Cultivos de produção de PHAs em frascos agitados	167
4.2.4.2 Cultivos de produção de PHAs em biorreatores de bancada.....	168
4.2.5 Determinação da biomassa e fontes de carbono	169
4.2.6 Determinação da atividade de lipase.....	169
4.2.7 Análise de PHAs	170
4.2.7.1 Determinação de PHAs por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massa (GC-MS)	170
4.2.7.2 Extração do polímero de <i>B. glumae</i> MA13	171
4.2.7.3 Análise de PHAs por espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR).....	171
4.2.7.4 Análise da massa molecular dos polímeros produzidos por <i>B. glumae</i> MA13 através de espalhamento estático de luz (SLS).....	171
4.2.7.5 Análise termogravimétrica dos polímeros produzidos por <i>B. glumae</i> MA13 (TGA).....	172
4.2.7.6 Análise dos polímeros produzidos por <i>B. glumae</i> MA13 por calorimetria exploratória diferencial (DSC)	172
4.3 Resultados e Discussão	173
4.3.1 Cultivos de produção de PHAs a partir de óleo de mamona, sebo bovino e óleo residual de fritura em frascos agitados	173
4.3.1.1 Produção de PHAs por <i>B. glumae</i> MA13 em diferentes temperaturas	173

4.3.1.2	Produção de PHAs por <i>B. glumae</i> MA13 em diferentes concentrações de NaCl.....	185
4.3.1.3	Influência de diferentes concentrações de fontes de carbono sobre a produção de PHAs por <i>B. glumae</i> MA13	196
4.3.1.4	Produção de PHAs por <i>B. glumae</i> MA13 utilizando diferentes fontes de nitrogênio.....	207
4.3.2	Cultivos de produção de PHAs por <i>B. glumae</i> MA13 a partir de óleo de mamona, sebo bovino e óleo residual de fritura em biorreatores.....	218
4.3.3	Análise do polímero produzido por <i>B. glumae</i> MA13 a partir de óleo de mamona, sebo bovino e óleo residual de fritura.....	233
4.4	Conclusões	243
CONCLUSÕES GERAIS		245
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		247

INTRODUÇÃO GERAL

O desenvolvimento tecnológico contemporâneo tem como um de seus principais alicerces a exploração de combustíveis fósseis. A queima de carvão mineral e gás natural, além da indústria do petróleo e seus derivados resultaram em um detrimento global dos ecossistemas, com altos índices de emissões de gases do efeito estufa e consequente aquecimento global acelerado, acidificação dos oceanos e aumento da poluição nos diversos ecossistemas (YAZDANI & GONZALES, 2007; NAIK et al., 2010). Neste contexto, as fontes de energia derivadas da biomassa têm ganhado destaque, pois as mesmas são consideradas neutras ou de baixa emissão de carbono atmosférico, uma vez que em etapas do ciclo bioenergético pode se correlacionar o envolvimento de produtores primários, capazes de assimilar CO₂ durante o crescimento para a realização da fotossíntese (INDERWILDI & KING, 2009; WELDEMICHAEAL & ASSEFA, 2016). A partir da matéria-prima renovável surgiram os combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos, os quais foram denominados biocombustíveis. Entre os biocombustíveis, o bioetanol e o biodiesel são definitivamente os exemplos mais estabelecidos de biocombustíveis de transporte, como aditivos e potenciais substitutos da gasolina e do óleo diesel (DEMIRBAS, 2008; DEMIRBAS, 2009; GAURAV et al., 2017; DE PAULA et al., 2018a). O bioetanol é o biocombustível de transporte mais produzido em todo o mundo, com uma produção global projetada para crescer de 122 bilhões de litros, em 2019, para 143 bilhões de litros, em 2028. Entre os maiores produtores de bioetanol, os EUA é o maior produtor da atualidade com 63,8 bilhões de litros, em 2019, seguido do Brasil, cuja produção atingiu 35,7 bilhões de litros na safra de cana-de-açúcar de 2019/20 (OECD/FAO, 2019; CONAB, 2020). Embora o bioetanol seja o biocombustível de transporte mais produzido em todo o mundo, a maioria das pesquisas científicas têm sido devotadas à produção de biodiesel. Os principais produtores de biodiesel incluem os EUA, Brasil, Alemanha, França, Argentina, Holanda e Indonésia, cujo investimento projeta expectativas de crescimento de produção de 31 bilhões de litros em 2015 para 44 bilhões de litros de biodiesel até 2028 (OECD-FAO, 2016; AZADIA et al., 2017; OECD/FAO, 2019).

Os bioetanol e o biodiesel têm sido suportados, principalmente, por mandatos de blendas, adicionados aos combustíveis convencionais, para atender à demanda dos setores de transporte e às metas governamentais de desenvolvimentos sustentável. Estes biocombustíveis têm sido obtidos na maioria das vezes a partir de “commodities” agrícolas, as quais são fontes de energia comestíveis, como grãos e sementes de oleaginosas, além de safras de açúcar e amido, sendo nesse caso denominados biocombustíveis de primeira geração. Os

biocombustíveis de segunda geração são obtidos a partir de matéria-prima não comestível, como materiais lignocelulósicos, culturas de curta rotação e gramíneas vegetativas, oleaginosas não comestíveis e sebo animal. Os biocombustíveis de segunda geração têm sido uma alternativa para mitigar a principal preocupação com os biocombustíveis de primeira geração, que é a escassez de alimentos e o detrimento das terras agricultáveis. Uma vantagem adicional é a utilização de subprodutos agrícolas e resíduos sólidos urbanos, reduzindo custos e melhorando a gestão de resíduos urbanos (DEMIRBAS, 2009).

Além do desequilíbrio ecológico gerado pela queima direta de combustíveis fósseis, uma variedade de derivados petroquímicos tem contribuído para o detrimento dos ecossistemas de nosso planeta. Os plásticos de origem petroquímica são exemplos clássicos associados a diversas questões ambientais. Devido à versatilidade destes polímeros, os mesmos têm sido empregados em diversas aplicações, ao ponto de se estabelecer uma sociedade extremamente dependente destes produtos. A alta demanda de mercado de plásticos, associado a um descarte inapropriado, e somada a alta persistência ambiental destes compostos, tornaram estes produtos uma ameaça global aos biomas aquáticos e terrestres (LETTIERI & AL-SALEM, 2011; KUNWAR et al., 2016). Os plásticos convencionais levam várias décadas para se decompor nos ecossistemas, além de produzir toxinas, particularmente por seus aditivos, tais como ftalatos como plastificantes, e resíduos monoméricos tóxicos, como o cloreto de vinila (SURIYAMONGKOL et al., 2007). Os microplásticos (partículas de plásticos menores que 5 mm) nos oceanos são imensamente danosos para os ecossistemas aquáticos, os quais se acumulam nas cadeias alimentares e inevitavelmente terminam na alimentação humana, o último consumidor desta cadeia alimentar (LACKNER, 2015). Ao lado desta questão ambiental surgiram os bioplásticos, os quais cumprem pelo menos uma destas duas características: derivado de biomassa ou biodegradabilidade. Portanto, um bioplástico deve ser de origem biológica, biodegradável ou ambos. Os bioplásticos exibem as mesmas propriedades ou propriedades semelhantes aos plásticos convencionais, com benefícios ambientais adicionais, como redução de carbono atmosférico, reciclagem orgânica ou ambos (EUROPEAN BIOPLASTICS, 2017).

Os polihidroxialcanoatos (PHAs) são bioplásticos de origem microbiana, produzidos como grânulos celulares por representantes dos domínios Bacteria e Archaea (STEINBÜCHEL & FÜCHTENBUSCH, 1998; OBRUCA et al., 2018; KOLLER, 2019; DE PAULA et al., 2021). Além de serem uma estratégia microbiana adaptativa, os PHAs são uma família de bioplásticos de origem biológica totalmente biodegradáveis. Além disso, os PHAs são polímeros

compostáveis, resultando em um solo rico em húmus (CHANPRATEEP, 2010; LACKNER, 2015; EUROPEAN BIOPLASTICS, 2017; DE PAULA et al., 2018b). Os PHAs também são biocompatíveis, característica atrativa para aplicações médicas e farmacêuticas, na produção de nanocápsulas para liberação controlada de fármacos, e nanofibras para geração de suportes na engenharia de tecidos (RODRIGUEZ-CONTRERAS, 2019). Por fim, os PHAs atendem às especificações padrões para degradação em ambiente marinho. Todas estas características fazem com que os PHAs sejam candidatos promissores a aplicações de produtos descartáveis ou de baixa vida (DE PAULA et al., 2018b). Devido ao aumento da consciência global a respeito da sustentabilidade e as metas propostas por acordos climáticos, o mercado de bioplásticos tem se tornado cada vez mais profissionalizado, com alternativas provenientes da biomassa para todos os tipos de aplicação. Embora o mercado de bioplásticos atinja ainda 1% de todo o mercado de polímeros, vários grupos de pesquisa e empresas têm focado seus esforços em atualizações tecnológicas na busca pela redução de custos e viabilização destes biopolímeros (CARUS, 2020). Uma vez que a indústria petroquímica tem sido a base de combustíveis e plásticos convencionais, um conceito de biorrefinaria para a produção integrada de biocombustíveis e bioplásticos tem sido proposto por vários autores para gerar biomoléculas de valor agregado, com o objetivo de viabilizar tais indústrias como um sistema de produção parcialmente ou totalmente independente do petróleo e seus derivados (ASHBY et al., 2011; CAVALHEIRO et al., 2012; DE PAULA et al., 2017; DE PAULA et al., 2019a; DE PAULA et al., 2021).

Neste contexto, *Burkholderia glumae* MA13 foi o microrganismo alvo deste estudo, uma linhagem bacteriana previamente isolada de solo de Mata Atlântica para a produção de PHAs a partir de glicerol bruto proveniente da indústria de biodiesel (DE PAULA et al., 2019b). Neste estudo, *B. glumae* MA13 foi avaliada em cultivos contendo uma ampla variedade de fontes de carbono relacionadas às cadeias de produção de bioetanol e biodiesel, na busca pela agregação de valores a ambas indústrias de biocombustíveis, através da produção associada de bioplásticos. Entre os insumos testados para a produção de PHAs estavam sacarose, glicerol, melado, vinhaça e hidrolisado de bagaço de cana-de-açúcar, glicerol bruto, óleos de palma, babaçu, mamona, sebo bovino e óleo residual de fritura. Além disso, testes de cultivos em biorreatores avaliaram a suplementação das fontes de carbono com ácido propiônico na busca de um copolímero poli(3-hidroxi butirato-co-3-hidroxi valerato) [P(3HB-co-3HV)] com propriedades diferenciadas comparadas ao homopolímero poli(3-hidroxi butirato) [P(3HB)], ambos pertencentes a grande classe de bioplásticos, os PHAs. Dessa forma, o presente trabalho

buscou avaliar o potencial de *B. glumae* MA13 na conversão de múltiplos insumos nestes biopolímeros, na tentativa de atestar a versatilidade metabólica de *B. glumae* MA13 para ser aplicada em diferentes processos produtivos ou até mesmo na adaptação de um único processo industrial a diferentes insumos, amenizando problemas de logística e sazonalidade na disponibilidade de matérias-primas para os setores produtivos.

CONCLUSÕES GERAIS

- Entre os insumos relacionados à indústria sucroalcooleira, melação de cana-de-açúcar foi a fonte de carbono mais promissora para a produção polihidroxialcanoatos (PHAs) por *Burkholderia glumae* MA13, cuja máxima produção foi alcançada em concentrações de 20 a 40 g/L, com valores variando de 2,5 a 2,7 g/L.
- Entre os insumos relacionados à indústria sucroalcooleira, o melação de cana-de-açúcar puro ou adicionado de 25% (v/v) de vinhaça de cana-de-açúcar induziu o metabolismo de *B. glumae* MA13 à síntese de PHAs, resultando nos maiores valores de rendimento na conversão de açúcares em polímero, com um máximo de 0,18 g/g.
- A análise estatística demonstrou que os valores de rendimento de conversão de fontes de carbono em polímero em meios de cultivo contendo melação de cana-de-açúcar adicionado de 25% (v/v) de vinhaça de cana-de-açúcar não divergiu estatisticamente dos valores de rendimento atingidos utilizando melação de cana-de-açúcar puro.
- Os valores de produção e acúmulo intracelular de polímero observados a partir do meio de cultivo composto pelos subprodutos da indústria sucroalcooleira melação e vinhaça de cana-de-açúcar foram superiores àqueles obtidos em meios de cultivo contendo sacarose pura.
- Neste estudo, a adição de 25% (v/v) de vinhaça de cana-de-açúcar a meios de cultivo contendo melação de cana-de-açúcar, sem perdas estatisticamente significativas na conversão de substrato em PHAs por *B. glumae* MA13, pôde ser considerada como uma estratégia sustentável na reutilização de um efluente potencialmente danoso a ecossistemas terrestres e aquáticos, além de oferecer 25% (v/v) de economia de água tratada destinada aos processos industriais.
- Entre as matérias-primas utilizadas para a produção de biodiesel de primeira geração, os cultivos realizados em meio mineral contendo óleo de palma atingiram os maiores valores de acúmulo intracelular de polímero, com um máximo de 84,6% MSC obtido em cultivos em frascos agitados, e um valor máximo de 60,8% MSC observado em cultivo em biorreator.
- Entre as matérias-primas utilizadas para a produção de biodiesel de primeira geração, a adição de ácido propiônico ao babaçu resultou na síntese de um copolímero P(3HB-co-3HV) por *B. glumae* MA13, contendo 18 mol% do monômero 3HV.

- Entre as fontes de carbono de cultivo relacionadas à produção de biodiesel de segunda geração, a maior produção e acúmulo intracelular de polímero foi alcançada em cultivos contendo sebo bovino, com 4,4 g/L e 42% MSC, respectivamente.
- Entre as fontes de carbono de cultivo relacionadas à produção de biodiesel de segunda geração, os cultivos em frascos agitados em meio mineral contendo óleo de mamona resultaram em um copolímero P(3HB-co-3HV), com até 6,4 mol% de 3HV sem a adição de qualquer precursor. A adição de ácido propiônico no cultivo em biorreator contendo óleo de mamona resultou em um copolímero com 21 mol% de 3HV.
- Entre todas as fontes de carbono testadas neste estudo, a maior produtividade volumétrica foi atingida em cultivo de biorreator em meio contendo óleo de palma, com um valor máximo de 0,16 g/(L.h), após 56 h.
- Entre as fontes hidrofóbicas de carbono avaliadas neste estudo, *B. glumae* MA13 apresentou produção de lipase, cujos valores máximos de atividade enzimática variaram de 66 a 481 U/mL, sendo este último valor máximo obtido a partir de óleo residual de fritura.
- As análises da massa molecular por espalhamento de luz estático (SLS) revelou polímeros com valores de massa molecular média variando de $1,3 \times 10^5$ a $2,7 \times 10^5$ Da, a partir das fontes hidrofóbicas avaliadas neste estudo.
- Os resultados das análises de calorimetria exploratória diferencial (DSC) dos polímeros produzidos por *B. glumae* MA13 a partir de fontes hidrofóbicas relacionadas à produção de biodiesel apresentou pontos de fusão variando de 147 a 165 °C, e graus de cristalinidade em uma faixa de 5,1 a 30,9%.
- As análises termogravimétricas (TGA) revelaram polímeros com temperaturas iniciais de degradação variando entre 230 e 297 °C, temperaturas de degradação máxima em uma faixa de 260 a 317 °C, e temperaturas de degradação térmica final de 319 a 334 °C.
- Todos os polímeros produzidos a partir de fontes de carbono hidrofóbicas apresentaram um intervalo térmico entre a temperatura de fusão e a temperatura de início de degradação térmica de no mínimo 79 °C.
- *B. glumae* MA13 apresentou produção de PHAs a partir de todas as fontes de carbono avaliadas neste estudo, e assim, pôde ser considerada uma linhagem versátil e promissora para a síntese destes polímeros a partir de uma ampla variedade de insumos relacionados à indústria de biocombustíveis e, portanto, atingindo o objetivo principal deste estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIEC. Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carne. Disponível em: <http://www.abiec.com.br>. Acesso em: 15 out. 2020.

AESCHELMANN, F.; CARUS, M. **Bio-Based Building Blocks and Polymers in the World-Capacities, Production and Applications: Status Quo and Trends toward 2020**. Hürth: Nova-Institut GmbH, 2015.

AFDC. **Drop-in Biofuels**. Washington, DC: Alternative Fuel Data Center, Department of Energy, 2012.

AFONSO, E.D. **Desenvolvimento de produtos de plásticos biodegradáveis**. Porto Alegre: Senai-RS, 2006.

AGNEW, D.E.; PFLEGER, B.F. Synthetic biology strategies for synthesizing polyhydroxyalkanoates from unrelated carbon sources. **Chem Eng Sci.**, v. 103, p. 58–67, 2013.

AGUS, J.; KAHAR, P.; ABE, H.; DOI, Y.; TSUGE, T. Molecular weight characterization of poly[(R)-3-hydroxybutyrate] synthesized by genetically engineered strains of *Escherichia coli*. **Polym. Degrad. Stab.**, v. 91, p. 1138-1146, 2006.

ALCARDE, A.R. Processamento da cana-de-açúcar: outros produtos. Agência de informação EMBRAPA. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br>. Acesso em: 18 nov. 2020.

ALMEIDA, A.F.; TAULK-TORNISIELO, S.M.; CARMONA, E.C. Influence of carbon and nitrogen sources on lipase production by a newly isolated *Candida viswanathii* strain. **Annals of Microbiology**, v. 63, p. 1225-1234, 2012.

ANDERSON, A.J.; DAWES, E.A. Occurrence, metabolism, metabolic role and industrial uses of bacterial polyhydroxyalkanoates. **Microbiol. Rev.**, New York, v. 54, p. 450-472, 1990.

ANJUM, A.; ZUBER, M.; ZIA, K.M.; NOREEN, A.; ANJUM, M.N.; TABASUM, S. Microbial production of polyhydroxyalkanoates (PHAs) and its copolymers: A review of recent advancements. **Int J Biol Macromol.**, v. 89, p. 161–174, 2016.

AREVALO-GALLEGOS, A.; AHMAD, Z.; ASGHER, M.; PARRA-SALDIVAR, R.; IQBAL, H.M.N. Lignocellulose: A sustainable material to produce value-added products with a zero waste approach - A review. **International Journal of Biological Macromolecules.**, v. 99, p. 308-318, 2017.

ARIKAWA, H.; MATSUMOTO, K.; FUJIKI, T. Polyhydroxyalkanoate production from sucrose by cupriavidus necator strains harboring csc genes from *Escherichia coli* W. **Appl. Microbiol. Biotechnol.**, v. 101, p. 7497–7507, 2017.

ARRIETA, M.P.; LÓPEZ, J.; RAVÓN, E., JIMÉNEZ, A. Disintegrability under composting conditions of plasticized PLA-PHB blends. **Polymer Degradation and Stability**, v. 108, p. 307-318, 2014.

ASHBY, R.D.; SOLAIMAN, D.K.Y., STRAHAN, G.D. Efficient utilization of crude glycerol as fermentation substrate in the synthesis of poly(3-hydroxybutyrate) biopolymers. **Am. Oil Chem. Soc.**, v. 88, p. 949-959, 2011.

AVILA-NETO, P.M.; DA SILVA, G.P.; LIMA, C.J.B.; DE PAULA, F.C.; CONTIERO, J. Evaluation and optimization of growth and citric acid production by *Yarrowia lipolytica* NRRL Y-1095 using glycerol as carbon source as an alternative to use biodiesel byproduct. **Journal of Experimental Biology and Agricultural Science**, v. 2, p. 25-31, 2014.

AZADIA, P.; MALINA, R.; BARRETTA, S.R.H.; KRAFT, M. The evolution of the biofuel science. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 76, p. 1479-1484, 2017.

BARBUZZI, T.; GIUFFRIDA, M.; IMPALLOMENI, G.; CARNAZZA, S.; FERRERI, A.; GUGLIELMINO, S.P.P.; BALLISTRERI, A. Microbial Synthesis of Poly(3-hydroxyalkanoates) by *Pseudomonas aeruginosa* from Fatty Acids: Identification of Higher Monomer Units and Structural Characterization. **Biomacromol.**, v. 5, p. 2469–2478, 2004.

BARHAM, P.J.; KELLER, A.; OTUN, E.L.; HOLMES, P.A. Crystallization and morphology of a bacterial thermoplastic: poly-3-hydroxybutyrate, **J. Mater. Sci.**, v. 19, p. 2781–2794, 1984.

BATENI, H.; KARIMI, K.; ZAMANI, A.; BENAKASHANI, F. Castor plant for biodiesel, biogas, and ethanol production with a biorefinery processing perspective. **Applied Energy**, v. 136, p. 14–22, 2014.

BELLO-GIL, D.; ROIG-MOLINA, E.; FONSECA, J.; SARMIENTO-FERRÁNDEZ, M.D.; FERRÁNDIZ, M.; FRANCO, E.; MIRA, E.; MAESTRO, B.; SANZ, J.M. An enzymatic system for decolorization of wastewater dyes using immobilized CueO laccase-like multicopper oxidase on poly-3-hydroxybutyrate. **Microb. Biotechnol.**, v. 11, p. 881-892, 2018.

BENGTSSON, S.; PISCO, A.R.; JOHANSSON, P.; LEMOS, P.C.; REIS, M.A.M. Molecular weight and thermal properties of polyhydroxyalkanoates produced from fermented sugar molasses by open mixed cultures. **Journal of Biotechnology**, v. 147, p. 172-179, 2010.

BHUBALAN, K.; LEE, W.H.; LOO, C.Y.; YAMAMOTO, T.; TSUGE, T.; DOI, Y.; SUDESH, K. Controlled biosynthesis and characterization of poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate-co-3-hydroxyhexanoate) from mixtures of palm kernel oil and 3HV-precursors. **Polym, Degrad, Stab.**, v. 93, p. 17–23, 2008.

BHUIYA, M.M.K.; RASULA, M.G.; KHANA, M.M.K.; ASHWATHB, N.; AZADA, K.; HAZRAT, M.A. Second Generation Biodiesel: Potential Alternative to-Edible Oil-Derived Biodiesel. **Energy Procedia**, v. 61, p. 1969 – 1972, 2014.

BIERNAT, K. Perspectives for global development of biofuel technologies to 2050. **Chemik**, v. 66. p. 1178-1189, 2012.

BIODIESEL BR. Disponível em: <https://www.biodieselbr.com/noticias/materia-prima/sebo/sebo-bovino-biodiesel-070812>. Acesso em: 17 out. 2020.

BOSE, A.; KEHARIA, H. Production, characterization and applications of organic solvent tolerant lipase by *Pseudomonas aeruginosa* AAU2. **Biocatal. Agric. Biotechnol.**, v. 2, p. 255–266, 2013.

BUGNICOURT, E.; CINELLI, P.; LAZZERI, A.; ALVAREZ, V. Polyhydroxyalkanoate (PHA): Review of synthesis, characteristics, processing and potential applications in packaging. **Express Polym Lett.**, v. 8, p. 791–808, 2014.

CAMPOS, M.I.; FIGUEIREDO, T.V.B.; SOUSA, L.S.; DRUZIAN, J.I. The influence of crude glycerin and nitrogen concentrations on the production of PHA by *Cupriavidus necator* using a response surface methodology and its characterizations. **Industrial Crops and Products**, v. 52, p. 338–346, 2014.

CANEVAROLO JR., S.V. **Técnicas de Caracterização de Polímeros**. São Paulo: Artliber Editora, 2004.

CAO, H.; LIU, T.; CHEW, S.Y. The application of nanofibrous scaffolds in neural tissue engineering. **Adv. Drug Deliv. Rev.**, v. 61, p. 1055–1064, 2016.

CARLSON, R.; SRIENC, F. Effects of recombinant precursor pathway variations on poly[(R)-3-hydroxybutyrate] synthesis in *Saccharomyces cerevisiae*. **J. Biotechnol.**, v. 124, p. 561–573, 2006.

CARUS, M. **Global Markets and Trends of Bio-based Building Blocks and Polymer 2019-2024**. Hürth: Nova-Institut GmbH, 2020.

CAVALHEIRO, J.M.B.T.; ALMEIDA, M.C.M.D.; GRANDFILS, C.; FONSECA, M.M.R. Poly(3-hydroxybutyrate) production by *Cupriavidus necator* using waste glycerol. **Process Biochemistry**, v. 44, p. 509-515, 2009.

CAVALHEIRO, J.M.B.T.; RAPOSO, R.S.; ALMEIDA, M.C.M.D.; CESÁRIO, M.T.; SEYRIN, C.; GRANDFILS, C.; FONSECA, M.M.R. Effect of cultivation parameters on the production of poly(3-hydroxybutyrate-co-4-hydroxybutyrate) and poly(3-hydroxybutyrate-4-hydroxybutyrate-3-hydroxyvalerate) by *Cupriavidus necator* using waste glycerol. **Bioresour Technol.**, v. 111, p. 391–397, 2012.

CHANDRA, P.; ENESPA, R.S.; ARORA, P.K. Microbial lipases and their industrial applications: a comprehensive review. **Microb. Cell Fact.**, v. 19:169, 2020.

CHANPRATEEP, S. Current trends biodegradable polyhydroxyalkanoates. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, v. 110, p. 621-632, 2010.

CHEN, G.Q.; PAGE, W.J. Production of poly-b-hydroxybutyrate by *Azotobacter vinelandii* in a two-stage fermentation process. **Biotechnol Tech.**, v. 11, p. 347-350, 1997.

CHEN, G.Q.; PATEL, M.K. Plastics Derived from Biological Sources: Present and Future: A Technical and Environmental Review. **Chemical Reviews**, v. 112, p. 2082–2099, 2012.

CHEN, G.Q.; HAJNAL, I.; WU, H.; LY, L.; YE, J. Engineering Biosynthesis Mechanisms for Diversifying Polyhydroxyalkanoates. **Trends Biotechnol.**, v. 33, p. 565–574, 2015.

CHEN, G.Q.; JIANG, X.R. Engineering microorganisms for improving polyhydroxyalkanoate biosynthesis. **Curr. Opin. Biotechnol.**, v. 53, p. 20–25, 2018.

CHHETRI, A.B.; WATTS, K.C.; ISLAM, M.R. Waste cooking oil as an alternate feedstock for biodiesel production. **Energies**, v. 1, p. 3–18, 2008.

CHOI, J.; LEE, S.Y. Process analysis and economic evaluation for poly(3-hydroxybutyrate) production by fermentation. **Bioprocess Eng.**, v. 17, p. 335–342, 1997.

CHRISTOFOLETTI, C.A.; ESCHER, J.P.; CORREIA, J.E.; MARINHO, J.F.U.; FONTANETTI, C.S. Sugarcane vinasse: environmental implications of its use. **Waste Manag.**, v. 33, p. 2752–2761, 2013.

CONAB. Acompanhamento de safra Brasileira: Cana-de-Açúcar, Segundo Levantamento, Agosto/2020. Brasília, Companhia Nacional de Abastecimento. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/>. Acesso em: 28 out. 2020.

CORRADINI, M.C.C.; COSTA, B.M.; BRESSANI, A.P.P.; GARCIA, K.C.; PEREIRA, E.B.; MENDES, A.A. Improvement of the enzymatic synthesis of ethyl valerate by esterification reaction in a solvent system. **Prep. Biochem. Biotechnol.**, v. 47, p. 100-109, 2017.

COSTA, S.G.V.A.O.; LÉPINE, F.; MILOT, S.; DÉZIEL, E.; NISTSCHKE, M.; CONTIERO, J. Cassava wastewater as a substrate for the simultaneous production of rhamnolipids and polyhydroxyalkanoates by *Pseudomonas aeruginosa*. **J. Ind. Microbiol. Biotechnol.**, Heidelberg, v.36, p. 1063-1072, 2009.

CROMWICK, A.M.; FOGLIA, T.; LENZ, R.W. The microbial production of poly(hydroxyalkanoates) from tallow. **Appl. Microbiol. Biotechnol.**, v. 46, p. 464–469, 1996.

CUI, B.; HUANG, S.; XU, F.; ZHANG, R.; ZHANG, Y. Improved productivity of poly (3-hydroxybutyrate) (PHB) in thermophilic *Chelatococcus daeguensis* TAD1 using glycerol as the growth substrate in a fed-batch culture. **Appl. Microbiol. Biotechnol.**, v. 99, p. 6009-6019, 2015.

CZERNIK, S.; BRIDGWATER, A.V. Overview of applications of biomass fast pyrolysis oil. **Energy Fuels.**, v. 18, p. 590-598, 2004.

DA SILVA, G.P.; MACK, M.; CONTIERO, J. Glycerol: a promising and abundant carbon source for industrial microbiology. **Biotechnol. Adv.** v. 27, p. 30-39, 2009.

DA SILVA, G.P.; LIMA, C.J.B.; CONTIERO, J. Production and productivity of 1,3-propanediol from glycerol by *Klebsiella pneumoniae* GLC29. **Catalysis Today**, v. 257, p. 259-266, 2015.

DATTA, S.; GOPALAKRISHMAN, M. Nanofibers from Polyhydroxyalkanoates and Their Applications in Tissue Engineering. In: KALIA, V.C. **Biotechnological Applications of Polyhydroxyalkanoates**. Singapore: Springer, 2019. p. 409-20.

DEBYE, P. Molecular-weight determination by light scattering. **J. Phys. Colloid Chem.**, v. 51, p. 18-32, 1947.

DEEPAK, V.; KALISHWARALAL, K.; GURUNATHAN, S. Purification, immobilization, and characterization of nattokinase on PHB nanoparticles. **Bioresour. Technol.**, v. 100, p. 6644-6646, 2009.

DEGLI ESPOSTI, M.; CHIELLINI, F.; BONDIOLI, F.; MORSELLI, D.; FABBRI, P. Highly porous PHB-based bioactive scaffolds for bone tissue engineering by in situ synthesis of hydroxyapatite. **Mater Sci. Eng. C**, v. 100, p. 286–296, 2019.

DEMIRBAS, A. Biofuels sources, biofuel policy, biofuel economy and global biofuel projections. **Energy Conversion Management**, v. 49, p. 2106-2116, 2008.

DEMIRBAS, M.F. Biorefineries for biofuel upgrading: A critical review. **App Energ.**, v. 86, p. S151-S161, 2009.

DE PAULA, F.C.; CAZETTA, M.L.; MONTI, R.; CONTIERO, J. Sucrose hydrolysis by gelatin-immobilized inulinase from *Kluyveromyces bulgaricus* var. *marxianus*. **Food Chemistry**, v. 111, p. 691 – 695, 2008.

DE PAULA, F.C.; KAKAZU, S.; DE PAULA, C.B.C.; GOMEZ, J.G.C.; CONTIERO, J. Polyhydroxyalkanoate production from crude glycerol by newly isolated *Pandoraea* sp. **J. King Saud Univ. Sci.**, v. 29, p. 166-173, 2017a

DE PAULA, F.C.; DE PAULA, C.B.C., GOMEZ, J.G.C.; STEINBÜCHEL, A., CONTIERO, J. Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) production from biodiesel by-product and propionic acid by mutant strains of *Pandoraea* sp. **Biotechnology Progress**, v. 33, p. 1077-1084, 2017b.

DE PAULA, F.C.; DE PAULA, C.B.C.; CONTIERO, J. Prospective Biodegradable Plastics from Biomass Conversion Processes. *In: BIERNAT, K. Biofuels - State of Development*. London: InTechOpen, 2018a. p. 245-272.

DE PAULA, F.C.; DE PAULA, C.B.C.; CONTIERO, J. Polyhydroxyalkanoates: A Short Tale from Polymer Synthesis to Future Prospects. *In: WILLIAMS, H.; KELLY, P. Polyhydroxyalkanoates: Biosynthesis, Chemical Structures and Applications*. New York: Nova Science Publishers, 2018b. p. 111-132.

DE PAULA, C.B.C.; DE PAULA, F.C.; CONTIERO, J. Bioplastics from Biodiesel Byproducts: A Green Alternative to Petroleum-Based Plastics and Fuels. *In: PINTO, L.F.R.; TAKASE, E.M.; SANTANA, H.S. A Closer Look at Biodiesel Production*. New York: Nova Science Publishers, 2019a. p. 269-290.

DE PAULA, F.C.; KAKAZU, S.; DE PAULA, C.B.B.; ALMEIDA, A.F.; GOMEZ, J.G.C.; CONTIERO, J. *Burkholderia glumae* MA13: a newly isolated bacterial strain suitable for polyhydroxyalkanoate production from crude glycerol. **Biocatal. Agric. Biotechnol.**, v. 20:101268, 2019b.

DE PAULA, C.B.C.; DE PAULA-ELIAS, F.C.; RODRIGUES, M.N.; COELHO, L.F.; OLIVEIRA, N.M.L.; ALMEIDA, A.F.; CONTIERO, J. Polyhydroxyalkanoate synthesis by *Burkholderia glumae* into a sustainable sugarcane biorefinery concept. **Front. Bioeng. Biotech.**, v. 8: 631284, 2021.

DE PAULA-ELIAS, F.C.; DE PAULA, C.B.C.; DE OLIVEIRA, N.M.L.; ALMEIDA, A.F.; CONTIERO, J. Polyhydroxyalkanoates: naturally occurring microbial polymers suitable for nanotechnology applications. In: KHARISOV, B.; KHARISSOVA, O. **Handbook of Greener Synthesis of Nanomaterials and Compounds**. Vol. 2: Synthesis at the Macroscale and Nanoscale. New York: Elsevier, 2021. No prelo.

DEVI, E.S.; VIJAVENDRA, S.V.N.; SHAMALA, T.R. Exploration of rice bran, an agroindustry residue, for the production of intra-and extra-cellular polymers by *Sinorhizobium meliloti* MTCC 100. **Biocatal. Agric. Biotechnol.**, v. 1, p. 80–84, 2012.

DIETRICH, K.; DUMONT, M.J.; DEL RIO, L.F.; ORSAT, V. Producing PHAs in the bioeconomy — Towards a sustainable bioplastic. **Sustain. Prod. Consum.**, v. 9. p. 58–70, 2017.

DU, C.; SABIROVA, J.; SOETAERT, W.; SZE LIN, S.K.C. Polyhydroxyalkanoates Production From Low-cost Sustainable Raw Materials. **Curr. Chem. Biol.**, v. 6, p. 14-25, 2012.

ENDO, Y.; HAYASHI, C.; YAMANAKA, T. TAKAYOSE, K.; YAMAOKA, M.; TSUNO, T.; NAKAJIMA, S. Linolenic Acid as the Main Source of Acrolein Formed During Heating of Vegetable Oils. **J. Am. Oil Chem. Soc.**, v. 90, p. 959–964, 2013.

EUROPEAN BIOPLASTICS (2017). What Are Bioplastics? Disponível em: <http://www.europeanbioplastics.org/news/publications/>. Acesso em: 14 out. 2020.

EUROPEAN BIOPLASTICS (2018). Fact Sheet What Are Bioplastics? Disponível em: https://docs.europeanbioplastics.org/publications/fs/EuBP_FS_What_are_bioplastics.pdf. Acesso em: 20 out. 2020.

FADZIL, F.I.M.; MIZUNO, S.; HIROE, A.; NOMURA, C.T.; TSUGE, T. Low carbon concentration feeding improves medium-chain-length polyhydroxyalkanoate production in *Escherichia coli* strains with defective b-oxidation. **Front. Bioeng. Biotechnol.**, v. 6:178, 2018.

FERNANDO, S.; SUSHIL, A.; CHAUDA, C.; NAVEEN, M. Biorefineries: Current Status, Challenges, and Future Direction. **Energy & Fuels**, v. 20, p. 1727-1737, 2006.

FIRESTONE, D. **Physical and Chemical Characteristics of Oils, Fats, and Waxes**. Champaign: AOCS Press, 2012.

FONSECA, C.P.; ROSA, D.S.; GABOARDI, F.; NEVES, S. Development of a biodegradable polymer electrolyte for rechargeable batteries. **J. Power Sources**, v. 155, p. 381–384, 2006.

FÜLOP, A.; BÉRES, R.; TENGÖLICS, R.; RÁKHELY, G.; KOVÁCS, K.L. Relationship between PHA and hydrogen metabolism in the purple sulfur phototrophic bacterium *Thiocapsa roseopersicina* BBS. **Int. J. Hydrogen Energy**, v. 37, p. 4915–4924, 2012.

GANGRADE, N.; PRICE, J.C. Poly(hydroxybutyrate-hydroxyvalerate) microspheres containing progesterone: preparation, morphology and release properties. **J. Microencapsulation**, v. 8, p. 185–202, 1991.

GAO, X.; CHEN, J.; WU, Q.; CHEN, G. Polyhydroxyalkanoates as a source of chemicals, polymers, and biofuels. **Curr. Opin. Biotechnol.**, v. 22, p. 768-774, 2011.

GÄTGENS, C.; DEGNER, U.; BRINGER-MEYER, S.; HERMANN, U. Biotransformation of glycerol to dihydroxyacetone by recombinant *Gluconobacter oxydans* DSM 2343. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 76, p. 553-559, 2007.

GAURAV, N.; SIVASANKARI, S.; KIRAN, G.S.; NINAWA, A.; SELVIN, J. Utilization of bioresources for sustainable biofuels: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 73, p. 205- 217, 2017.

GEOFFRY, K.; ACHUR, R.N. Optimization of novel halophilic lipase production by *Fusarium solani* strain NFCCL 4084 using palm oil mill effluent. **J. Genet. Eng. Biotechnol.**, v. 16, p. 327–334, 2018.

GOMEZ, J.G.C.; RODRIGUES, M.F.A.; ALLI, R.C.P.; TORRES, B.B.; BUENO NETTO, C.L.; SILVA, L.F. Evaluation of soil gram-negative bacteria yielding polyhydroxyalkanoic acids from carbohydrates and propionic acid. **Appl. Microbiol. Biotechnol.**, v.45, p785-791, 1996.

GRANDE, D.; RAMIER, J.; VERSACE, D.L.; RENARD, E.; LANGLOIS, V. Design of functionalized biodegradable PHA-based electrospun scaffolds meant for tissue engineering applications. **New Biotechnol.**, v. 37, p. 129–137, 2017.

GUI, Z.; WANG, H.; DING, T.; ZHU, W.; ZHUANG, X.; CHU, W. Azithromycin reduces the production of α -hemolysin and biofilm formation in *Staphylococcus aureus*. **Indian J. Microbiol.**, v. 54, p. 114–117, 2014.

GUMEL, A.M.; ANNUAR, M.S.M. Nanocomposites of Polyhydroxyalkanoates (PHAs). In: ROY, V.; VISAKH, P.M. **Polyhydroxyalkanoate (PHA) based Blends, Composites and Nanocomposites**. London: RSM Green Chemistry, 2015. p. 98-118.

GUO, M.; SONG, W.; BUHAIN, J. Bioenergy and biofuels history, status, and perspective. **Renewable and Sustainable Energy Reviews.**, v. 42, p. 712-725, 2015.

GUPTA, N.; SAHAI, V.; GUPTA, R. Alkaline lipase from a novel strain *Burkholderia multivorans*: statistical medium optimization and production in a bioreactor. **Process Biochem.**, v. 42, p. 518–526, 2007.

GURURAJ, P.; RAMALINGAM, S.; NANDHINI DEVI, G.; GAUTAM, P. Process optimization for production and purification of a thermostable, organic solvent tolerant lipase from *Acinetobacter* sp. AU07. **Braz. J. Microbiol.**, v. 47, p. 647–657, 2016.

HAJIALI, H.; KARBASI, S.; HOSSEINALIPOUR, M.; REZAIIE, H.R. Preparation of a novel biodegradable nanocomposite scaffold based on poly (3-hydroxybutyrate)/bioglass

nanoparticles for bone tissue engineering. **J. Materials Sci. Materials Med.**, v. 7, p. 2125-2132, 2010.

HASS, R.; JIN, B.; ZEPF, F.T. Production of Poly(3-hydroxybutyrate) from waste potato starch. **Biosci. Biotechnol. Biochem.**, v. 72, p. 253-256, 2008.

HASSAN, M.A.; AHMAD FARID, M.A.; SHIRAI, Y.; ARIFFIN, H.; OTHMAN, M.R.; SAMSUDIN, M.H.; HASAN, M.Y. Oil Palm Biomass Biorefinery for Sustainable Production of Renewable Materials. **Biotechnol. J.**, v. 14: 1800394, 2019.

HEINRICH, D.; RABER, M.; FRICKE, P.; KENNY, S.T.; MORALES-GAMEZ, L.; BABU, R.P.; O'CONNOR, K.E.; STEINBÜCHEL, A. Synthesis gas (syngas)-derived medium-chainlength polyhydroxyalkanoate synthesis in engineered *Rhodospirillum rubrum*. **Appl. Environ. Microbiol.**, v. 82, p. 6132–6140, 2016.

HOPEWELL, J.; DVORAK, R.; KOSIOR, E. Plastics recycling: Challenges and opportunities. **Philosophical Transactions in Royal Society B: Biological Science**, v. 364, p. 2115-2126, 2009.

HUANG, T.Y.; DUAN, K.J.; HUANG, S.Y.; CHEN, C.W. Production of polyhydroxyalkanoates from inexpensive extruded rice bran and starch by *Haloferax mediterranei*. **J. Ind. Microbiol. Biotechnol.**, v. 33, p. 701-706, 2006.

HUJBERTS, G. N. M., VAN DER WAL, H., WILKINSON, C., and EGGINK, G. Gas-chromatographic analysis of poly(3-hydroxyalkanoates) in bacteria. **Biotechnol. Tech.** 8: 187-192, 1994.

IBRAHIM, M.H.A.; STEINBÜCHEL, A. *Zobellella denitrificans* strain MW1, a newly isolated bacterium suitable for poly(3-hydroxybutyrate) production from glycerol. **J. Appl. Microbiol.**, v. 108, p. 214–225, 2010.

IEA. **World Energy Outlook 2014**. Paris: International Energy Agency, 2014.

ILES, A.; MARTIN, A.N. Expanding bioplastics production: Sustainable business innovation in the chemical industry. **Journal of Cleaner Production.**, v. 45, 38-49, 2013.

INDERWILDI, O.; KING, D. Quo vadis biofuels? **Energy & Environmental Science**, v. 2, p. 343-346, 2009.

ISHIDA, K.; HORTENSIUS, R.; LUO, X.; MATHER, P.T. Soft bacterial polyester-based shape memory nanocomposites featuring reconfigurable nanostructure. **J. Polym. Sci. B: Polym. Physics**, v. 50, p. 387-393, 2012.

ITO, T.; NAKASHIMADA, Y.; SENBA, K.; MATSUI, T.; NISHIO, N. Hydrogen and ethanol production from glycerol-containing wastes discharged after biodiesel manufacturing process. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, v. 100, p. 260-265, 2005.

JANG, J.H.; CASTANO, O.; KIM, H.W. Electrospun materials as potential platforms for bone tissue engineering. **Adv. Drug Deliv. Rev.**, v. 61, p. 1065–1083, 2009.

JOURNEY STAFF. An Ambitious Goal: Reducing Carbon in Our Value Chain By: Journey Staff (2017). Disponível em: <http://www.coca-colacompany.com/stories/an-ambitious-goal-reducing-carbon-in-our-value-chain>. Acesso em 17 out. 2020.

KAMILAH, H.; AL-GHEETHI, A.; YANG, T.A.; SUDESH, K. The use of palm oil-based waste cooking oil to enhance the production of polyhydroxybutyrate [P(3HB)] by *Cupriavidus necator* H16 strain. **Arab. J. Sci. Eng.**, v. 43, p. 3453–3463, 2018.

KANG, Z.; DU, L.; KANG, J.; WANG, Y.; WANG, Q.; LIANG, Q.; QI, O. Production of succinate and polyhydroxyalkanoate from substrate mixture by metabolically engineered *Escherichia coli*. **Bioresour. Technol.**, v. 102, p. 6600–6604, 2011.

KILIÇAY, E.; DEMIRBILEK, M.; TÜRK, M.; GÜVEN, E.; HAZER, B.; DENKBAS, E.B. Preparation and characterization of poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyhexanoate) (PHBHHX) based nanoparticles for targeted cancer therapy. **Eur. J. Pharm. Sci.**, v. 44, p. 310–320, 2011.

KIM, Y.B.; LENZ, R.W. Polyesters from microorganisms. **Adv. Biochem. Eng. Biotechnol.**, v. 71, p. 51–79, 2001.

KNOTHE, G.; RAZON, L.F. Biodiesel fuels. **Prog. Energy Combust. Sci.**, v. 58, p. 36–59, 2017.

KOLLER, M.; BONA, R.; CHIellini, E.; FERNANDES, E.G.; HORVAT, P.; KUTSCHERA, C.; HESSE, P.; BRAUNEGG, G. Polyhydroxyalkanoate production from whey by *Pseudomonas hydrogenovora*. **Bioresour. Technol.**, v. 99, p. 4854–4863, 2008.

KOLLER, M.; ATLIC, AID, DIAS, M.; REITERER, A.; BRAUNEGG, G. Microbial PHA Production from Waste Raw Materials. In: CHEN, G.Q. **Plastics from Bacteria: Natural Functions and Applications**. Verlag Berlin Heidelberg: Springer, 2010. p. 86-119.

KOLLER, M.; HESSE, P.; SALERNO, A.; REITERER, A.; BRAUNEGG, G. A viable antibiotic strategy against microbial contamination in biotechnological production of polyhydroxyalkanoates from surplus whey. **Biomass Bioenerg.**, v. 35, p. 748-753, 2011.

KOLLER, M.; MARŠALEK, L.; DE SOUSA DIAS, M.M.; BRAUNEGG, G. Producing microbial polyhydroxyalkanoate (PHA) biopolyesters in a sustainable manner. **N. Biotechnol.**, v. 37, p. 24–38, 2017.

KOLLER, M. Polyhydroxyalkanoate biosynthesis at the edge of water activity-haloarchaea as biopolyester factories. **Bioengineering**, v. 6: 34, 2019.

KONG, B.; MI, S. Electrospun scaffolds for corneal tissue engineering: a review. **Materials**, v. 9, p. 1–20, 2016.

KRUEGER, C.L.; RADETSKI, C.M.; BENDIA, A.G.; OLIVEIRA, I.M.; CASTRO-SILVA, M.A.; RAMBO, C.R.; ANTONIO, R.V.; LIMA, A.O.S. Bioconversion of cassava starch by-product into *Bacillus* and related bacteria polyhydroxyalkanoates. **J. Biotechnol.**, v. 15, p. 1-13, 2012.

KUNWAR, B.; CHENG, H.N.; CHANDRASHEKARAN, S.R.; SHARMA, B.K. Plastics to fuel: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 54, p. 421-428, 2016.

KULPREECHA, S.; BOONRUANGTHAVORN, A.; MEKSIRIPORN, B.; THONGCHUL, N. Inexpensive fed-batch cultivation for high poly(3-hydroxybutyrate) production by a new isolate of *Bacillus megaterium*. **J. Biosci. Bioeng.**, v. 107, p. 240-245, 2009.

LACKNER, M. Bioplastics-biobased plastics as renewable and/or biodegradable alternatives to petroplastics. In: **Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology**. New Jersey: Wiley, 2015. pp. 1-41.

LAMA, L.; NICOLAUS, B.; CALANDRELLI, V.; MANCA, M.C.; ROMANO, I.; GAMBACORTA, A. Effect of growth conditions on endo and exopolymer biosynthesis in *Anabaena cylindrica* 10C. **Phytochemistry**, v. 42, p. 655-659, 1996.

LAU, N.; CHEE, J.; TSUGE, T.; SUDESH, K. Biosynthesis and mobilization of a novel polyhydroxyalkanoate containing 3-hydroxy-4-methylvalerate monomer produced by *Burkholderia* sp. USM (JCM15050). **Bioresource Technol.**, v. 101, p. 7916-7923, 2010.

LAYCOCK, B.; HALLEY, P.; PRATT, S.; WERKER, A.; LANT, P. The chemomechanical properties of microbial polyhydroxyalkanoates. **Progress in Polymer Science**, v. 38, p. 536-583, 2013.

LEE, E.Y.; CHOI, C.Y. Gas chromatography-mass spectrometry analysis and its application to a screening procedure for novel bacterial polyhydroxyalkanoic acids containing long chain saturated and unsaturated monomers. **J. Ferment. Bioeng.**, v. 80, p. 408-414, 1995.

LEE, S.Y.; MIDDELBERG, A.P.J.; LEE, Y.K. Poly(3-hydroxybutyrate) production from whey using recombinant *Escherichia coli*. **Biotechnol. Lett.**, v. 19, p. 1033-1035, 1997.

LEE, J.; JUNG, S.G.; PARK, C.S.; KIM, H.Y.; BATT, C.A.; KIM, Y.R. Tumor-specific hybrid polyhydroxybutyrate nanoparticle: surface modification of nanoparticle by enzymatically synthesized functional block copolymer. **Bioorg. Medicin. Chem. Lett.**, v. 21, p. 2941-2944, 2011.

LETTIERI, P.; AL-SALEM, S. Thermochemical treatment of plastic solid waste. In: LETCHER, T.M.; VALLERO, D.A. **Waste: A Handbook for Management**. Burlington: Academic Press (Elsevier), 2011.

LEVETT, I.; BIRKETT, G.; DAVIES, N.; BELL, A.; LANGFORD, A.; LAYCOCK B.; LANT, P.; PRATT, S. Techno-economic assessment of poly-3-hydroxybutyrate (PHB) production from methane-The case for thermophilic bioprocessing. **J. Environ. Chem. Eng.**, v. 4, p. 3724-3733, 2016.

LI, P.; ZHANG, J.; LIU, J.; LIE, P.; WANG, Y.; LIU, G.; ZENG, H.; LI, Z.; WEI, X. Promoting the recovery of injured liver with poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate-co-3-hydroxyhexanoate) scaffolds loaded with umbilical cord-derived mesenchymal stem cells. **Tissue Eng.**, v. 21, p. 603-615, 2015.

LI, W.C.; TSE, H.F.; FOK, L. Plastic waste in the marine environment: A review of sources, occurrence and effects. **Science Total Environment**, v. 566-567, p. 333-349, 2016.

LI, T.; ELHADI, D.; CHEN, G.Q. Co-production of microbial polyhydroxyalkanoates with other chemicals. **Metab. Eng.**, v. 43, p. 29–36, 2017.

LI, R.; YANG, J.; XIAO, Y.; LONG, L. In vivo immobilization of an organophosphorus hydrolyzing enzyme on bacterial polyhydroxyalkanoate nano-granules. **Microb. Cell Fact.**, v. 18:166, 2019.

LI, M.; WILKINS, M.R. Recent advances in polyhydroxyalkanoate production: feedstocks, strains and process developments. **Int. J. Biol. Macromol.**, v. 156, p. 691–703, 2020.

LIEW, Y.X.; CHAN, Y.J.; SHOW, P.L.; MANICKAM, S.; CHONG, M.F. Optimization of alkaline lipase production from *Burkholderia cepacia* through submerged fermentation. **Chem. Eng. Trans.**, v. 45, p. 1675–1680, 2015.

LOPES, M.S.G.; GOMES, J.G.C.; TACIRO, M.K.; MENDONÇA, T.T.; SILVA, L.F. Polyhydroxyalkanoate biosynthesis and simultaneous removal of organic inhibitors from sugarcane bagasse hydrolysate by *Burkholderia* sp. **J. Ind. Microbiol. Biotechnol.**, v. 41, p. 1353–1363, 2014.

LU, X.; WANG, L.; YANG, Z.; LU, H. Strategies of polyhydroxyalkanoates modification for the medical application in neural regeneration/nerve tissue engineering. **Adv. Biosci. Biotechnol.**, v. 4, p. 731–740, 2013.

MACRAE, R.M.; WILKINSON, J.F. Poly- β -hydroxybutyrate metabolism in washed suspensions of *Bacillus cereus* and *Bacillus megaterium*. **J. Gen. Microbiol.**, v. 19, p. 210–222, 1958.

MADISON, L.L.; HUISMAN, G.W. Metabolic engineering of poly(3-hydroxyalkanoates): from DNA to plastic. **Microbiol. Mol. Biol. Rev.** v. 63, p. 21-53, 1999.

MANOCHIO, C.; ANDRADE, B.R.; RODRIGUEZ, R.P.; MORAES, B.S. Ethanol from biomass: A comparative overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews.**, v. 80, p. 743-755, 2017.

MASOOD, F.; CHEN, P.; YASIN, T.; HASAN, F.; AHMAD, B.; HAMEED, A. Synthesis of poly-(3-hydroxybutyrate-co-12 mol % 3-hydroxyvalerate) by *Bacillus cereus* FB11: its characterization and application as a drug carrier. **J. Mater. Sci. Mater. Med.**, v. 24, p. 1927–1937, 2013a.

MASOOD, F.; CHEN, P.; YASIN, T.; FATIMA, N.; HASAN, F.; HAMEED, A. Encapsulation of Ellipticine in poly-(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) based nanoparticles and its in vitro application. **Mater. Sci. Eng. C. Mater. Biol. Appl.**, v. 33, p. 1054–1060, 2013.

MELANI, N.B.; TAMBOURGI, E.B.; SILVEIRA, E. Lipases: From Production to Applications. **Separation & Purification Reviews**, v. 49, p. 143-158, 2020.

MENDES, A.A.; OLIVEIRA, P.C.; VÉLEZ, A.M.; GIORDANO, R.L.C.; DE CASTRO, H.F. Evaluation of immobilized lipases on poly-hydroxybutyrate beads to catalyze biodiesel synthesis. **Int. J. Biol. Macromol.**, v. 50, p. 503-511, 2012.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Bovinos e Rubalinos. Disponível em <http://www.agricultura.gov.br/animal/especies/bovinos-ebubalinos>. Acesso em: 17 out. 2020.

MIRANDA, J.S.; SILVA, N.C.; BASSI, J.J.; CORRADINI, M.C.; LAGE, F.A.; HIRATA, D.B.; MENDES, A.A. Immobilization of *Thermomyces lanuginosus* lipase on mesoporous poly-hydroxybutyrate particles and application in alkyl esters synthesis: isotherm, thermodynamic and mass transfer studies. **Chem. Eng. J.**, v. 251, p. 392-403, 2014.

MITOMMO, H.; TAKAHASHI, T.; ITO, H.; SAITO, T. Biosynthesis and characterization of poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) produced by *Burkholderia cepacia* D1. **Int. J. Biol. Macromol.**, v. 24, p. 311-318, 1999.

MIYAKE, M.; ERATA, M.; ASADA, Y. A thermophilic cyanobacterium, *Synechococcus* sp. MA19, capable of accumulating poly- β -hydroxybutyrate. **Journal of Fermentation and Bioengineering**, v. 82, p. 512-514, 1996.

MORALEJO-GÁRATE, H.; MAR'ATUSALIHAT, E.; KLEEREBEZEM, R.; LOOSDRECHT, M.C.M. Microbial community engineering for biopolymer production from glycerol. **Appl. Microbiol. Biotechnol.**, v. 92, p. 631-639, 2011.

MORGAN-SAGASTUME, F.; HEIMERSSON, S.; LAERA, G.; WERKER, A.; SYANSTRÖM, M. Techno-environmental assessment of integrating polyhydroxyalkanoate (PHA) production with services of municipal wastewater treatment. **J. Clean. Prod.**, v. 137, p. 1368-1381, 2016.

MOTHES, G.; SCHNORPFEIL, C.; ACKERMANN, J.U. Production of PHB from crude glycerol. **Eng. Life Sci.** v. 7, n. 5, p. 475-479, 2007.

MOZEJKO, J.; CIESIELSKI, S. Pulsed feeding strategy is more favorable to medium-chain-length polyhydroxyalkanoates production from waste rapeseed oil. **Biotechnol. Prog.**, v. 30, p. 1243-1246, 2014.

NAIK, S.N.; GOUD, V.V.; ROUT, P.K.; DALAI, A.K. Production of first and second-generation biofuels: A comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, p. 578-597, 2010.

NASPOLINI, B.F.; MACHADO, A.C.O.; CRAVO JUNIOR, W.B.; FREIRE, M.G.; CAMMAROTA, M.C. Bioconversion of sugarcane vinasse into high-added value products and energy. **Biomed. Res.**, 8986165, 2017.

NATARAJAN, K., KISHORE, L., BABU, C.R. Characteristics of NaCl stress associated proteins of *Rhizobium* under varying cultural conditions. **J. Basic Microbiol.** 35 (6): 413-420, (1995).

NAYLOR, R.L.; HIGGINS, M.M. The political economy of biodiesel in an era of low oil prices. **Renewable Sustainable Energy Reviews**, v. 77, p. 695-705, 2017

NEULING, U.; KALTSCHMITT, M. Review of biofuel production - Feedstocks, processes and market. **Journal of Oil Palm Research**, v. 29, p. 137-167, 2017.

NICOL, R.W.; KAREN, M.; LUBITZ, W. Bioconversion of crude glycerol by fungi. **Applied Microbiology Biotechnology**, v. 93, p. 1865-1875, 2012.

NISHIOKA, M.; NAKAI, K.; MIYAKE, M.; ASADA, Y.; TAYA, M. Production of poly- β -hydroxybutyrate by thermophilic cyanobacterium, *Synechococcus* sp. MA19, under phosphate-limited conditions. **Biotechnology Letters**, v. 23, p. 1095-1099, 2001.

NOREEN, A.; ZIA, K.M.; ZUBER, M.; ALI, M.; MUJAHID, M. A critical review of algal biomass: A versatile platform of bio-based polyesters from renewable resources. **Int. J. Biol. Macromol.**, v. 86, p. 937-949, 2016.

OBRUCA, S., MAROVA, I., STANKOVA, M., MRAVCOVA, L., SVOBODA, Z. Effect of ethanol and hydrogen peroxide on poly(3-hydroxybutyrate) biosynthetic pathway in *Cupriavidus necator* H16. **World J. Microbiol. Biotechnol.** 26: 1261–1267, 2010.

OBRUCA, S.; SEDLACEK, P.; KOLLER, M.; KUCERA, D.; PERNICOVA, I. Involvement of polyhydroxyalkanoates in stress resistance of microbial cells biotechnological consequences and applications. **Biotechnol. Adv.**, v. 36, p. 856–870, 2018.

OECD/FAO. **OECD-FAO Agricultural Outlook 2016-2025**. Paris: OECD Publishing, Paris/Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2016.

OECD/FAO. **OECD-FAO Agricultural Outlook 2019-2028**. Rome: OECD Publishing, Paris/Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2019.

OLSSON, L.; HAHN-HÄGERDAL, B. Fermentation of lignocellulosic hydrolysates for ethanol production. **Enzyme Microb. Technol.**, v. 18, p. 312–331, 1996.

ONG, Y.T.; AHMAD, A.L.; ZEIN, S.H.S.; SUDESH, K.; TAN, S.H. Poly(3-hydroxybutyrate)-functionalised multi-walled carbon nanotubes/chitosan green nanocomposite membranes and their application in pervaporation. **Sep. Purif. Technol.**, v. 76, p. 419–427, 2011.

PAL, S.; MANNA, A.; PAUL, A.K. Production of poly (β -hydroxybutyric acid) and exopolysaccharide by *Azotobacter beijerinckii* WDN-01. **World J. Microbiol. Biotechnol.**, v. 15, p. 11–16, 1999.

PAN, W.; PERROTTA, J.A.; STIPANOVIC, A.J.; NOMURA, C.T.; NAKAS, J.P. Production of polyhydroxyalkanoates by *Burkholderia cepacia* ATCC 17759 using a detoxified sugar maple hemicellulosic hydrolysate. **J. Ind. Microbiol. Biotechnol.**, v. 39, p. 459–469, 2012.

PANTAZAKI, A.A.; TAMBAKA, M.G.; LANGLOIS, V.; GUERIN, P.; KYRIAKIDIS, D.A. Polyhydroxyalkanoate (PHA) biosynthesis in *Thermus thermophilus*: purification and biochemical properties of PHA synthase. **Mol. Cell Biochem.**, v. 254, p. 173-183, 2003.

PANTAZAKI, A.A.; PAPANEOPHYTOU, C.P.; PRITSA, A.G.; LIAKOPOULOU-KYRIAKIDIS, D.A. Production of polyhydroxyalkanoates from whey by *Thermus thermophilus* HB8. **Process Biochem.**, v. 44, p.847-853, 2009.

PAPANEOPHYTOU, C.; KATSIPIIS, G.; HALEVAS, E.; PANTAZAKI, A.A. Polyhydroxyalkanoates Applications in Drug Carriers. *In*: KALIA, V. **Biotechnological Applications of Polyhydroxyalkanoates**. Singapore: Springer, 2019. p. 77-124.

PARKA, S.; LIHA, E.; PARKA, K.; JOUNG, Y.K.; HAN, D.K. Biopolymer-based functional composites for medical applications. **Progress in Polymer Science**, v. 68, p. 77-105, 2017.

PERNICOVA, I.; KUCERAA, D.; NEBESAROVAB, C.; KALINAA, M.; NOVACKOVAA, I.; KOLLER, M.; OBRUCA, S. Production of polyhydroxyalkanoates on waste frying oil employing selected *Halomonas* strains. *Bioresource Technology*, v. 292:122028, 2019.

PRADIMA, J.; RAJESWARI, M.; KULKARNI, A. Review on enzymatic synthesis of value-added products of glycerol, a by-product derived from biodiesel production. **Resource-Efficient Technologies**, v. 3, p. 394-405, 2017.

PRIELER, S.; FISCHER, G. Agricultural by-products associated with biofuel production chains. *In*: ECN. **Report D5.1 of ELOBIO WP5: Assessment of Biofuel Policy Impacts in Food and Feed Markets**. Petten: Energy research Centre of the Netherlands (ECN); 2009.

QIU, Y.Z.; HAN, J.; CHEN, G.Q. Metabolic engineering of *Aeromonas hydrophila* for the enhanced production of poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyhexanoate). **Appl. Microbiol. Biotechnol.**, v. 69, p. 537-542, 2006.

RAI, R.; KESHAVARZ, T.; ROETHER, J.A.; BOCCACCINI, A.R.; ROY, I. Medium chain length polyhydroxyalkanoates, promising new biomedical materials for the future. **Mater. Sci. Eng. R. Reports**, v. 72, p. 29-47, 2011.

RAMSAY, B.A.; LOMALIZA, K.; CHAVARIE, C.; DUBÉ, B.; BATAILLE, P.; RAMSAY, J.A. Production of poly-(beta-hydroxybutyric-co-beta-hydroxyvaleric) acids. **Appl. Environ. Microbiol.** v. 56, p. 2093-2098, 1990.

RAN, G.; TAN, D.; ZHAO, J.; FAN, F.; ZHANG, Q.; WU, X.; FAN, P.; FANG, X.; LU, X. Functionalized polyhydroxyalkanoate nano-beads as a stable biocatalyst for cost-effective production of the rare sugar d-allulose. **Bioresour. Technol.**, v. 89:121673, 2019.

RAZA, Z.A.; ABID, S.; BANAT, I.M. Polyhydroxyalkanoates: Characteristics, production, recent developments and applications. **Int. Biodeterior. Biodegradation.**, v. 126, p. 45-56, 2018.

REHM, B.H.A. Polyester synthases: natural catalysts for plastics. **Biochem. J.** v. 376, p. 15-33, 2003.

REHM, B.H.A. Genetics and biochemistry of polyhydroxyalkanoate granule self-assembly: The key role of polyester synthases. **Biotechnol. Lett.**, v. 28, p. 207-213, 2006.

REHM, B.H.A. Bacterial polymers: biosynthesis, modifications and applications. **Nature Reviews Microbiology**, v. 8, p. 578-592, 2010.

REHM, F.B.; CHEN, S.; REHM, B.H. Enzyme engineering for in situ immobilization. **Molecules**, v. 21:1370, 2016.

REHM, F.B.; CHEN, S.; REHM, B.H. Bioengineering toward direct production of immobilized enzymes: a paradigm shift in biocatalyst design. **Bioeng.**, v. 9, p. 6–11, 2018.

REHM, B.H.; HOOKS, D.O.; VENNING-SLATER, M.; DU, J. Polyhydroxyalkanoate synthase fusions as a strategy for oriented enzyme immobilisation. **Molecules**, v. 19, p. 8629-8643, 2019.

REIS, C.E.R.; HU, B. Vinasse from sugarcane ethanol production: better treatment or better utilization? **Front. Energy Res.**, v. 5:7, 2017.

REIS, H.F.A.F.; LIMA, L.P.; PEREZ, R. Palma no Brasil Viabilidade da produção de óleo ou biodiesel? **Revista de Política Agrícola**, v. 26, p. 20-30, 2017.

RIEDEL, S.L.; JAHNS, S.; KOENIG, S.; BOCK, M.C.E.; BRIGHAM, C.J.; BADER, J.; STAHL, U. Polyhydroxyalkanoates production with *Ralstonia eutropha* from low quality waste animal fats. **Journal of Biotechnology**, v. 214, p. 119–127, 2015.

ROCHA, M.H.; LORA, E.E.S.; VENTURINI, O.J. Life cycle analysis of different alternatives for the treatment and disposal of ethanol vinasse. **Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol.**, v. 26, p. 1075–1085, 2007a.

ROCHA, R.C.S.; PEREIRA, F.S.; TACIRO, M.K.; RODRIGUES, M.F.A.; PRADELLA, J.G.C. Controle da biossíntese de polihidroxialcanoatos bacterianos através de fluxos de substratos. **Química Nova**, v. 30, n. 1, p.53-55, 2007b.

RODRIGUES, P.R.; NUNES, J.M.N.; LORDELO, L.N.; DRUZIAN, J.I. Assessment of polyhydroxyalkanoate synthesis in submerged cultivation of *Cupriavidus necator* and *Burkholderia cepacia* strains using soybean as substrate. **Brazilian Journal of Chemical Eng.**, v. 36, p. 74-83, 2019.

RODRIGUEZ-CONTRERAS, A. Recent Advances in the Use of Polyhydroxyalkanoates in Biomedicine. **Bioengineering**, v. 6:32, 2019.

ROESSL, U.; NAHÁLKA, J.; NIDETZKY, B. Carrier-free immobilized enzymes for biocatalysis. **Biotechnol. Lett.**, v. 32, p. 341-350, 2010.

ROSTRUP-NIELSON, J.R. Making fuels from biomass. **Science**, v. 308, p. 1421-1422, 2005.

SADAT-SHOJAI, M.; KHORASANI, M.T.; JAMSHIDI, A. A new strategy for fabrication of bone scaffolds using electrospun nano-HAp/PHB fibers and protein hydrogels. **Chem. Eng. J.**, v. 289, p. 38–47, 2016.

SANTOS, F.; FICHLER, P.; MACHADO, G.; DE MATTIA, J.; DE SOUZA, G. Byproducts of the sugarcane industry. *In*: SANTOS, F.; RABELO, S.C.; DE MATOS, M.; EICHLER, P.

Sugarcane Biorefinery, Technology and Perspectives. Cambridge: Academic Press, 2020. p. 21–48.

SCHMIDELL, W., LIMA, U.A.; AQUARONE, E.; BORZANI, W. **Biotecnologia Industrial** Volume 2. Engenharia Bioquímica. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 2001.

SEN, K.Y.; HUSSIN, M.H.; BAIDURAH, S. Biosynthesis of poly(3-hydroxybutyrate) (PHB) by *Cupriavidus necator* from various pretreated molasses as carbon source. **Biocatal. Agric. Biotechnol.**, v. 17, p. 51–59, 2019.

SENDIL, D.; GÜRSEL, I.; WISE, D.L.; HASIRCI, V. Antibiotic release from biodegradable PHBV microparticles. **J.Cont. Release**, v. 59, p. 207–217, 1999.

SHAH, M.; ULLAH, N.; CHOI, M.H.; KIM, M.O.; YOON, S.C. Amorphous amphiphilic P(3HV-co-4HB)- b-mPEG block copolymer synthesized from bacterial copolyester via melt transesterification: nanoparticle preparation, cisplatin-loading for cancer therapy and in vitro evaluation. **Eur. J. Pharm. Biopharm.**, v. 80, p. 518–527, 2012.

SHIMAMURA, E.; KASUVA, K.; KOBAYASHI, G.; SHIOTANI, T.; SHIMA, Y.; DOI, Y. Physical properties and biodegradability of microbial poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyhexanoate). **Macromol.**, v. 27, p. 878-80, 1994.

SHISHATSKAYA, E.I.; GOREYA, A.V.; VOINOVA, O.N.; INZHEVATKIN, E.V.; KHLEBOPROS, R.G.; VOLOVA, T.G. Evaluation of antitumor activity of rubomycin deposited in absorbable polymeric microparticles. **B. Exp. Biol. Med.**, v. 145, p. 358–361, 2008.

SHRIVASTAV, A.; KIM, H.Y.; KIM, Y.R. Advances in the applications of polyhydroxyalkanoate nanoparticles for novel drug delivery system. **BioMed Res. Int.**, 12, 2013.

SILVA, L.F.; TACIRO, M.K.; MICHELIN RAMOS, M.E.; CARTER, J.M.; PRADELLA, J.G.C.; GOMEZ, J.G.C. Poly-3-hydroxybutyrate (P3HB) production by bacteria from xylose, glucose and sugarcane bagasse hydrolysate. **J. Ind. Microbiol. Biotechnol.**, v. 31, p. 245–254, 2004.

SILVA, N.C.; MIRANDA, J.S.; BOLINA, I.C.; SILVA, W.C.; HIRATA, D.B.; DE CASTRO, H.F.; MENDES, A.A. Immobilization of porcine pancreatic lipase on poly-hydroxybutyrate particles for the production of ethyl esters from macaw palm oils and pineapple flavor. **Biochem. Eng. J.**, v. 82, p. 139-149, 2014.

SIM, S.J.; SNELL, K.D.; HOGAN, S.A.; STUBBE, J.; RHA, C.; SINSKEY, A.J. PHA synthase activity controls the molecular weight and polydispersity of polyhydroxybutyrate in vivo. **Nat. Biotechnol.**, v. 15, p. 63–67, 1997.

SODIAN, R.; SPERLING, J.S.; MARTIN, D.P.; EGOZY, A.; STOCK, U.; MAYER, J.E.; VACANTI, J.P. Fabrication of a trileaflet heart valve scaffold from a polyhydroxyalkanoate biopolyester for use in tissue engineering. **Tissue Eng.**, v. 6, p. 183–188, 2000.

SOLAIMAN, D.K.Y.; ASHBY, R.D.; FOGLIA, T.A.; MARMER, W.N. Conversion of agricultural feedstock and coproducts into poly(hydroxyalkanoates). **Appl. Microbiol. Biotechnol.** v. 71, p. 783-789, 2006.

SONG, H.; LEE, S.Y. Production of succinic acid by bacterial fermentation. **Enzyme and Microbial Technology**, v. 39, p. 352-361, 2006.

STEFANOVIC, E.; KILCAWLEY, K.N.; ROCES, C.; REA, M.C.; O'SULLIVAN, M.; SHEEHAN, J.J.; McAULIFFE, O. Evaluation of the potential of *Lactobacillus paracasei* adjuncts for flavor compounds development and diversification in short-aged cheddar cheese. **Front. Microbiol.**, v. 9:1506, 2018.

STEINBÜCHEL, A.; VALENTIN, H. Diversity of bacterial polyhydroxyalkanoic acids. **FEMS Microbiol. Lett.** v. 128, p. 128-219, 1995.

STEINBÜCHEL, A.; FÜCHTENBUSCH, B. Bacterial and other biological systems for polyester production. **Trends Biotechnol.** v. 16, p. 419-427, 1998.

STEINBÜCHEL, A.; LÜTKE-EVERSLOH, T. Biochemical Engineering and pathway construction for biotechnological production of relevant polyhydroxyalkanoates in microorganisms. **Biochem. Eng. J.** v. 16, p. 81-96, 2003.

STEINMANN, B.; CHRISTMANN, A.; HEISELER, T.; FIRTZ, J.; KOLMAR, H. In vivo enzyme immobilization by inclusion body display. **Appl. Environ. Microbiol.**, v. 76, p. 5563-5569, 2010.

SUDESH, K.; ABE, H.; DOI, Y. Synthesis, structure and properties of polyhydroxyalkanoates: biological polyesters. **Progress in Polymer Science**, v. 25, p. 1503-1555, 2000.

SURENDRAN, A.; LAKSHMANAN, M.; CHEE, J.Y.; SULAIMAN, A.M.; THUOC, D.V.; SUDESH, K. Can Polyhydroxyalkanoates Be Produced Efficiently From Waste Plant and Animal Oils? **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v. 8:169, 2020.

SURIYAMONGKOL, P.; WESELAKE, R.; NARINE, S.; MOLONEY, M.; SHAH, S. Biotechnological approaches for the production of polyhydroxyalkanoates in microorganisms and plants – A review. **Biotechnol. Advances**, v. 25, p. 148-175, 2007.

TARRAHI, R.; FATHI, Z.; SEYDIBEYOĞLU, DOUSTKHAH, E.; KHATAEE, A. Polyhydroxyalkanoates (PHA): From production to nanoarchitecture. **Int. J. Biol. Macromol.**, v. 146, p. 596-619, 2020.

TEBAS, S.O.G.; BARAÑANO, A.G.; PINHEIRO, P.F.; LACERDA, V. Mild conditions in the transesterification reaction of babassu oil and purified fusel oil. **Chemical Engineering Communications**, v. 208, p. 432-440, 2021.

THAKOR, N.; TRIVEDI, U.; PATER, K.C. Biosynthesis of medium chain length poly(3-hydroxyalkanoates) (mcl-PHAs) by *Comamonas testosteroni* during cultivation on vegetable oils. **Bioresource Technology**, v. 96, p. 1843–1850, 2005.

TOKIWA, Y.; CALABIA, B.P.; UGWU, C.U.; AIBA, S. Biodegradability of plastics. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 10, p. 3722-3742, 2009.

TOLOUE, E.B.; KARBASI, S.; SALEHI, H.; RAFIENIA, M. Evaluation of Mechanical Properties and Cell Viability of Poly (3-Hydroxybutyrate)-Chitosan/Al(2)O(3) Nanocomposite Scaffold for Cartilage Tissue Engineering. **J. Med. Signals Sens.**, v. 9, p. 111–121, 2019.

TOTARO, G.; CRUCIANI, L.; VANNINI, M.; MAZZOLA, G.; DI GIOIA, D.; CELLI, A.; SISTI, L. Synthesis of castor oil-derived polyesters with antimicrobial activity. **European Polymer Journal**, v. 56, p. 174-184, 2014.

US ENERGY INFORMATION AND ADMINISTRATION. International Energy Statistics (2017). Disponível em: www.eia.org. Acesso em: 20 out. 2020a.

US ENERGY INFORMATION AND ADMINISTRATION. U.S. Fuel Ethanol Plant Production Capacity Archives. Disponível em: www.eia.org. Acesso em: 20 out. 2020b.

VAN-THUOC, D.; QUILLAGUAMN, J.; MAMO, G.; MATTIASSON, B. Utilization of agricultural residues for poly(3-hydroxybutyrate) production by *Halomonas boliviensis* LC1. **J. Appl. Microbiol.**, v. 104, p. 420-428, 2008.

WANG, Q.; TAPPEL, R.C.; ZHU, C.J.; NOMURA, C.T. Development of a new strategy for production of medium-chain-length polyhydroxyalkanoates by recombinant *Escherichia coli* via inexpensive non-fatty acid feedstocks. **Appl. Environ. Microbiol.**, v. 78, p. 519–527, 2012.

WANG, Y.; CHEN, R.; CAI, J.Y.; LIU, Z.; ZHENG, Y.; WANG, H.; LI, Q.; HE, N. Biosynthesis and Thermal Properties of PHBV Produced from Levulinic Acid by *Ralstonia eutropha*. **PLoS ONE**, v. 8:60318, 2013.

WEC. **WORLD ENERGY RESOURCES (2016)**. London: World Energy Council (WEC), 2016.

WEILAND, P. Biogas production: Current state and perspectives. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 85, p. 849-860, 2010.

WELDEMICHAEL, Y.; ASSEFA, G. Assessing the energy production and GHG (greenhouse gas) emissions mitigation potential of biomass resources for Alberta. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 4257-4264, 2016.

WONG, J.X.; OGURA, K.; CHEN, S.; REHM, B.H. Bioengineered Polyhydroxyalkanoates as Immobilized Enzyme Scaffolds for Industrial Applications. **Front. Bioeng. Biotechnol.**, v. 8:156, 2020a.

WONG, J.X.; GONZALES-MIRO, M.; SUTHERLAND-SMITH, A.J.; REHM, B.H. Covalent functionalization of bioengineered polyhydroxyalkanoate spheres directed by specific protein-protein interactions. **Front. Bioeng. Biotechnol.**, v. 8:44, 2020b.

WORLD BIOENERGY ASSOCIATION. **Fact Sheet on Biogas-an Important Renewable Energy Source**. Stockholm, Sweden: World Bioenergy Association, 2013.

XIAO, N.; JIAO, N. Formation of polyhydroxyalkanoate in aerobic anoxygenic phototrophic bacteria and its relationship to carbon source and light availability. **Appl. Environ. Microbiol.**, v. 77, p. 7445–7450, 2011.

XU, J.; JIANG, J.; SUN, Y.; LU, Y. Bio-oil upgrading by means of ethyl ester production in reactive distillation to remove water and to improve storage and fuel characteristics. **Biomass and Bioenergy**, v. 32, p. 1056-1061, 2008.

XU, F.; HUANG, S.; LIU, Y.; ZHANG, Y.; CHEN, S. Comparative study on the production of poly (3-hydroxybutyrate) by thermophilic *Chelatococcus daeguensis* TAD1: a good candidate for large-scale production. **Appl. Microbiol. Biotechnol.**v. 98, p. 3965-3974, 2014.

YAMANE, T. Yield of poly-D(-)-3-hydroxybutyrate from various carbon sources: a theoretical study. **Biotechnol. Bioeng.**, v. 41, p. 165-170, 1993.

YANG, D.; PORNPATTANANANGKUL, D.; NAKATSUJI, T.; CHAN, M.; CARSON, D.; HUANG, C.M.; ZHANG, L. The antimicrobial activity of liposomal lauric acids against *Propionibacterium acnes*. **Biomaterials**, v. 30, p. 6035-6040, 2009.

YANG, F.; HANNA, M.A.; SUN, R. Value-added uses for crude glycerol-a byproduct of biodiesel production. **Biotechnol. Biofuels.**, v. 5:13, 2012.

YAZDANI, S.S.; GONZALEZ, R. Anaerobic fermentation of glycerol: a path to economic viability for the biofuels industry. **Current Opinion in Biotechnol.**, London, v. 18, p. 213-219, 2007.

YELLORE, V.; DESAI, A. Production of poly-3-hydroxybutyrate from lactose and whey by *Methylobacterium sp.* ZP24. **Lett. Appl. Microbiol.** v. 26, p. 391-394, 1998.

YILMAZ, M.; BEVATLI, Y. Poly- β -hydroxybutyrate (PHB) production by a *Bacillus cereus* MS strain in sugarbeet molasses. **Zuckerindustrie**, v. 130, p. 109-112, 2005.

YU, J.; STAHL, H. Microbial utilization and biopolyester synthesis of bagasse hydrolysates. **Bioresour. Technol.**, v. 99, p. 8042–8048, 2008.

YU, J.; PORTER, M.; JAREMKO, M. Generation and Utilization of Microbial Biomass Hydrolysates in Recovery and Production of Poly(3-hydroxybutyrate). *In*: MATOVIC, M.D. **Biomass Now-Cultivation and Utilization**. London: InTechOpen, 2013. p. 33-48.

ZAMBANINI, T.; SARIKAYA, E.; KLEINEBERG, W.; BUESCHER, J.M.; MEURER, G.; WIERCKX, N.; BLANK, L.M. Efficient malic acid production from glycerol with *Ustilago trichophora* TZ1. **Biotechnology for Biofuels**, v. 9:67, 2016.

ZHANG, C.; ZHAO, L.; DONG, Y.; ZHANG, X.; LIN, J.; CHEN, Z. Folate-mediated poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyoctanoate) nanoparticles for targeting drug delivery. **Eur. J. Pharm. Biopharm.**, v. 76, p. 10-16, 2010.

ZHANG, A.; SUN, J.; WANG, Z.; YANG, S.; ZHOU, H. Effects of carbon dioxide on cell growth and propionic acid production from glycerol and glucose by *Propionibacterium acidipropionici*. **Bioresource Technology**, v. 175, 374-381, 2015.

ZHAO, Y.H., LI, H.M., QIN, L.F., WANG, H.H., CHEN, G.Q. Disruption of the polyhydroxyalkanoate synthase gene in *Aeromonas hydrophilia* reduces its survival ability under stress conditions. **FEMS Microbiol. Lett.** 276: 34–41, 2007.

ZHU, C.; NOMURA, C.T.; PERROTTA, J.A.; STIPANOVIC, A.J.; NAKAS, J.P. Production and Characterization of Poly-3-hydroxybutyrate From Biodiesel-Glycerol by *Burkholderia cepacia* ATCC 17759. **Biotechnol. Prog.**, 2010, v. 26, p. 424-430, 2010.