

ESTADO DA ARTE DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DOS RESÍDUOS DO PROCESSAMENTO DA MANDIOCA

*STATE OF THE ART OF BIOGAS PRODUCTION FROM WASTE FROM CASSAVA
PROCESSING*

**ADRIANO HENRIQUE FERRAREZ, EVERALDO VIEIRA PINTO, MARCOS
ANTÔNIO CRUZ MOREIRA**

RESUMO: O cultivo de mandioca é o terceiro mais importante da região tropical depois do arroz e do milho. É produzida em mais de 90 países, principalmente da África, América Latina e Ásia. A atividade apresenta uma alta produção de efluentes com enorme potencial de poluição do meio ambiente. A produção de biogás a partir desses efluentes consiste em uma alternativa para a gestão eficiente dos resíduos minimizando o impacto ambiental. Neste trabalho foi realizada a avaliação do estado da arte da produção de biogás a partir de resíduos de mandioca. A maioria dos trabalhos avaliados apresentou resultados positivos em relação à produção de biogás com diferentes substratos para digestão anaeróbia, com ênfase na manipueira. Os estudos sobre o tema são relevantes dada a importância econômica da mandioca, seu papel de garantidora da segurança alimentar de milhões de pessoas e a possibilidade de geração de energia a partir de seus resíduos contribuindo para a sustentabilidade da atividade.

Palavras chave: energia renovável, digestão anaeróbica, manipueira.

ABSTRACT: Cassava cultivation is the third most important in the tropical region after rice and corn. It produces in over 90 countries, mainly from Africa, Latin America, and Asia. The activity has a high effluent production with huge potential for environmental pollution. The production of biogas from these effluents is an alternative for efficient waste management, minimizing the environmental impact. In this work, we evaluate the state of the art of biogas production from cassava residues. Most of the studies evaluated presented positive results regarding biogas production with different substrates for anaerobic digestion, with emphasis on manipueira. Studies on the subject are relevant given the economic importance of cassava, its role as guarantor of the food security of millions of people, and the possibility of generating energy from their waste contributing to the sustainability of the activity.

Keywords: renewable energy, anaerobic digestion, manipueira

INTRODUÇÃO

O cultivo de mandioca é o terceiro mais importante da região tropical depois do arroz e do milho. É produzida em mais de 90 países se apresentando como uma boa fonte de carboidratos podendo ser produzida em condições adversas ao contrário de outras culturas. O mercado global de processamento de mandioca cresceu cerca de 2,6% no período de 2011 a 2018, atingindo um volume de produção de em torno de 253,4 milhões de toneladas em 2018. A atividade representa o sustento da população em países da África, América Latina e Ásia, fornecendo alimento e renda. A maior parte da mandioca produzida é consumida diretamente e o restante é processado como amido, farinha, pellets, chips, etc. O processamento da mandioca promove a remoção de toxinas, aumenta sua vida útil, reduz seu peso e aumenta seu valor geral. Os produtos obtidos do processamento da mandioca possuem várias aplicações em vários setores, alguns dos quais incluem - alimentos, etanol, papel e papelão, têxteis, produtos farmacêuticos, colas e adesivos (RESEARCH AND MARKETS, 2019).

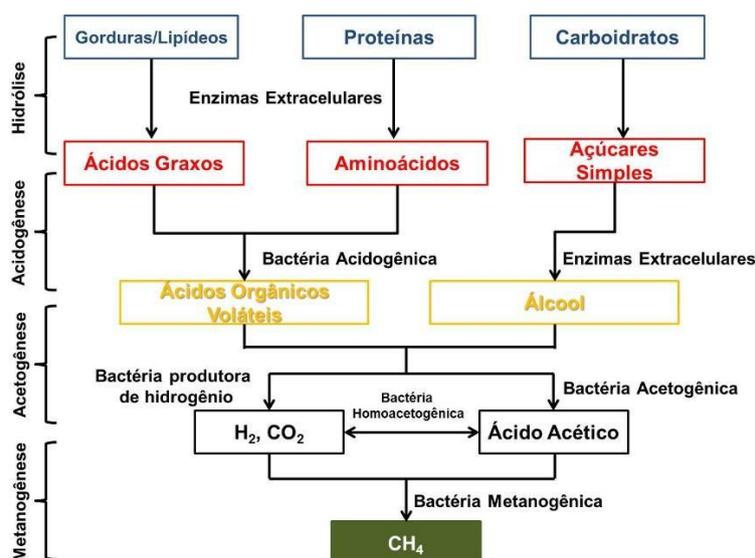
A manipueira é caracterizada por sua elevada concentração de material orgânico [Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)] (SILVA et al., 2009). A manipueira constitui um resíduo danoso ao meio ambiente uma vez que para cada tonelada de mandioca processada somente na fase de fabricação de farinha e amido são gerados aproximadamente 300 litros de manipueira. Este efluente tem potencial poluidor cerca de 25 vezes maior que o esgoto doméstico. Quando lançado diretamente em corpos de água provoca a alteração da capacidade de autodepuração e a eutrofização. Dependendo do tipo de processamento utilizado durante o beneficiamento da mandioca, a manipueira, pode apresentar diferentes concentrações de ácido cianídrico (HCN) e compostos tóxicos como a linamarina, que pode se combinar com a hemoglobina do sangue e bloquear o sistema respiratório (SANTOS, 2009).

Uma das alternativas para o tratamento dos resíduos da produção de mandioca é a biodigestão anaeróbia que consiste na degradação de material orgânico por meio da ação de microrganismos. A biodigestão anaeróbia dá origem a dois subprodutos, o biogás e o biofertilizante (CALDEREIRO, 2015;

COSTA et al., 2016; MONTORO, 2017). O processo pode gerar benefícios: (i) ambientais (pela eliminação de resíduos dispostos de modo irregular, diminuindo a contaminação da água, do solo e do ar); (ii) sociais (evitando contato humano aos resíduos e à proliferação de pragas e outras doenças relacionadas à falta de saneamento básico); (iii) econômicos (que podem ser percebidos por meio da geração de energia renovável com uma tecnologia limpa, bem como pelo uso de biofertilizante, de grande importância para as pastagens e adubação em geral) (BARBOSA & LANGER, 2011).

A formação do biogás ocorre em fases. A primeira fase é a hidrólise em que atuam bactérias hidrolíticas que transformam compostos orgânicos complexos, como carboidratos e proteínas, em compostos simples, como açúcares e aminoácidos. Na fase seguinte, a acidogênese, as bactérias acidogênicas agem formando álcoois, ácido lático e ácidos graxos de cadeia curta. A acetogênese inicia-se após a acidogênese, formando o ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono, devido a ação de bactérias acetogênicas. O último estágio se dá a formação do metano (CH_4) pela ação das arqueas metanogênicas, que são organismos estritamente anaeróbios (SALMINEN & RINTALA, 2002). A Figura 1 resume as fases da digestão anaeróbica.

Figura 1. Esquema da digestão anaeróbica



Fonte: Adaptado de (MAO, et al. 2015; AL SEADI, 2001)

A biodigestão anaeróbica ocorre em câmaras chamadas biodigestores. O primeiro biodigestor foi construído em Bombaim na Índia em 1857, destinado à

produção de gás combustível para um hospital de hansenianos. Em 1890, Cameron delineou uma fossa séptica na Inglaterra, sendo o gás produzido utilizado para iluminação pública. Com o advento da 2ª Guerra Mundial, a biodigestão anaeróbia foi extensamente disseminada nos países europeus, usando-se o biogás em substituição aos derivados de petróleo por meio da queima direta e o uso em veículos (PALHARES, 2020).

No Brasil a tecnologia dos digestores anaeróbicos teve seu maior desenvolvimento na década de 1980. Cerca de oito mil digestores, principalmente dos modelos chinês e indiano, foram instalados por meio de programa dos Ministérios da Agricultura e Minas e Energia. Mas a tecnologia encontrou dificuldades para se consolidar levando-a a cair em descrédito no meio rural. O corte de verbas para a continuidade do programa foi o principal motivo. Outro fator foi o reduzido nível de escolaridade da maioria dos produtores brasileiros. A digestão anaeróbica envolve conhecimentos de, por exemplo, microbiologia, física e química e estes conteúdos não são abordados no ensino fundamental. Isso demandaria a realização de treinamentos e a oferta de assistência técnica periódica a estes produtores (ANDRADE et al., 2002; ALMEIDA, 2008).

O objetivo deste trabalho foi avaliar o estado da arte da produção de biogás a partir dos resíduos do processamento da mandioca, partindo-se de uma revisão de literatura e chegando-se a dados bibliométricos, que segundo Mugnaini et al. (2004), são valores estatísticos, mensurados quantitativamente, baseados na produção científica.

MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia utilizada neste trabalho foi o levantamento bibliográfico, baseado em artigos científicos publicados em revistas nacionais e internacionais indexadas. Foram produzidos dados quantitativos bibliométricos a fim de caracterizar as referências bibliográficas utilizadas considerando o ano, nome da revista, país em que o trabalho foi realizado e as informações essenciais de cada artigo. Para realizar a busca dos artigos, foram consideradas algumas bases de dados, como Scielo, Scopus, Periódicos da CAPES e Google Acadêmico, baseadas nas palavras-chave: digestão anaeróbia, *anaerobic digestion*, biogás,

biogas, mandioca, *cassava*, biodigestor, *digester*, codigestão anaeróbia, *anaerobic codigestion*, energia renovável e *renewable energy*.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Estado da arte da produção de biogás a partir dos resíduos da mandioca

Kuczman et al. (2011), avaliaram a produção de biogás utilizando a manipueira em reator de fluxo tubular horizontal de fase única considerando-se o aumento da carga orgânica e do volume de substrato introduzido no reator e sua implicação na redução do tempo de retenção hidráulica (TRH). O biodigestor foi alimentado com cargas orgânicas de 1,18; 1,28; 1,57 e 2,68 g DQO L⁻¹ rd⁻¹ (gramas de demanda química de oxigênio por litro de reator dia) em tempos de retenção hidráulica de 15,0; 13,0; 8,3 e 6,6 dias, respectivamente. Os volumes médios de biogás produzido em L L⁻¹ rd⁻¹ (litro de biogás por litro de reator dia) foram de 0,52 para TRH = 15 dias; 0,41 para TRH = 13 dias; 0,65 para TRH = 8,3 dias; e 0,63 para TRH = 6,6 dias. A partir dos resultados obtidos pôde-se concluir que a diminuição do TRH teve como consequência uma maior produção de biogás. O estudo mostrou que com um TRH adequado pode-se dimensionar de forma mais eficiente o volume do reator o que implica em economia na implantação da tecnologia para tratamento dos resíduos em indústrias processadoras de mandioca.

Zhang et al. (2011), estudaram a construção de um consórcio microbiano de alta degradação de celulose e aplicação deste consórcio no pré-tratamento de resíduos de mandioca com a finalidade de aumentar o rendimento de metano. Os principais parâmetros dos resíduos de mandioca obtidos por meio de três repetições foram os seguintes: sólidos totais (ST), 95,60 ± 1,41; sólidos voláteis (SV), 84,32 ± 1,34; celulose, 24,92 ± 0,43; hemicelulose, 17,84 ± 0,28; lignina, 12,28 ± 0,22; e nitrogênio total (NT), 1,34 ± 0,04 (em mg L⁻¹); e água residuárias: DQO, 24580 ± 258; NT, 288,96 ± 12,34; ST, 19,39 ± 0,03; SV, 14,12 ± 0,11 (em mg L⁻¹); e pH, 4,23 ± 0,02. Os métodos utilizados no trabalho foram: (i) solução de peptona celulose; (ii) consórcio microbiano com alta degradação celulósica; (iii) determinação dos microrganismos; (iv) pré-tratamento biológico; (v) e digestão anaeróbia. Os resultados, experimentais mostraram que a produção

máxima de metano ($259,46 \text{ mL g SV}^{-1}$) de resíduos de mandioca foi obtida por 12 h de pré-tratamento pelo consórcio microbiano, 96,63% superior ao controle ($131,95 \text{ mL g SV}^{-1}$). O consórcio microbiano construído revela alta degradação de celulose, onde o papel de filtro na cultura poderia ser totalmente quebrado dentro de 48 h de incubação. A produção de lignocelulose extracelular e enzimas degradantes é desejável na hidrólise de resíduos mandioca, o que beneficia ainda mais a digestão anaeróbica. Concluiu-se que pré-tratamento biológico de resíduos de mandioca utilizando o consórcio microbiano como inóculo tem grande potencial para aumentar a produção de metano.

Suzuki et al. (2012), realizaram experimento utilizando água residuária de fécula de mandioca e cama de aviário de frango de corte com o objetivo de buscar a melhor mistura entre os resíduos gerados em grande quantidade no Brasil. Procederam aos seguintes tratamentos em seu experimento: (A) 0 % de manipueira e 100% cama de aviário; (B) 20% manipueira e 80% cama de aviário; (C) 40% manipueira e 60% cama de aviário; (D) 60% manipueira e 40% cama de aviário; (E) 80% manipueira 20% cama de aviário; (F) 100% manipueira e 0% cama de aviário. Em todos os tratamentos foram adicionados inóculos na proporção de 25 % do volume para completar o volume final do material em biodigestão, visando equalizar as misturas. Foram utilizados biodigestores de fluxo descontínuo (batelada), com capacidade de 3,5 litros feito com cano de PVC, separadamente foram construídos gasômetros acoplados ao biodigestor por mangueiras. Os biodigestores foram inseridos em caixa d'água de 3000 litros que no seu centro continha outra caixa com capacidade de 500 litros onde foram dispostos os gasômetros a uma temperatura constante de 36°C controlada por termostato. Foi realizada análise estatísticas com os dados obtidos em cada tratamento sendo que o tratamento (A) obteve a maior produção de biogás por sólidos $0,39 \text{ litros d}^{-1}$, 9% a mais que o tratamento (B). O tratamento (A) se destacou também na produção específica de biogás com $0,11 \text{ litros d}^{-1}$ e produção de CH_4 total e específica na ordem de $21,77 \text{ litros d}^{-1}$ e $6,22 \text{ litros d}^{-1}$, respectivamente. Os autores concluíram que os substratos utilizados no estudo, apesar de sua degradação lenta, proporcionaram uma produção satisfatória de biogás.

Silva et al. (2013) avaliaram a biodigestão anaeróbia com substrato formado pela combinação de esterco ovino e caprino, manipueira e a adição de

25% de biofertilizante proveniente do mesmo substrato. Os objetivos específicos do trabalho foram: (i) monitorar o pH; (ii) quantificar a eficiência da biodigestão anaeróbia na redução de sólidos totais; e (iii) quantificar a produção de biogás. O biodigestor utilizado foi o modelo indiano, com capacidade útil de 80 litros e com tempo de retenção hidráulica de 50 dias, abastecido de forma contínua. O experimento foi realizado no Instituto Federal de Alagoas – Campus Marechal Deodoro, durante 130 dias. Os autores observaram que, com o acréscimo de 25% de biofertilizante no substrato, reduziu-se a quantidade de solução alcalina usada na correção do pH, alcançando valores de pH médio entre 7,0 e 7,85. A adição de biofertilizante proporcionou a redução global de 40,85% de sólidos totais e uma produção média semanal de 5,36 litros de biogás por kg de substrato. A biodigestão anaeróbia demonstrou ser uma alternativa eficiente para o tratamento da combinação dos resíduos orgânicos utilizados no experimento.

Moshi et al. (2014), avaliaram uma espécie selvagem de mandioca (*Manihot glaziovii*), como matéria-prima para a produção de bioenergia. Tubérculos obtidos de 3 áreas diferentes na Tanzânia foram caracterizados e avaliados para produção de bioetanol e biogás. Esses transportadores de bioenergia foram produzidos separadamente e sequencialmente e seus valores de energia avaliados com base nessas duas abordagens. A análise de composição demonstrou que a *M. glaziovii* é uma matéria-prima adequada para a produção de bioetanol e biogás. O teor de amido variou de 77% a 81%, os carboidratos estruturais de 3 a 16%, o total de proteína bruta variou de 2% a 8%. A fermentação alcançou uma concentração de etanol de até 85 g L⁻¹ com uma eficiência de fermentação de 89%. A energia dos combustíveis bioetanol e metano da mistura de cascas de farinha variaram de 5 a 13 e 11 a 14 MJ kg SV⁻¹, respectivamente. A coprodução de bioetanol e biogás, na qual as cascas foram adicionadas ao resíduo de fermentação antes da digestão anaeróbica, implicou em um rendimento energético máximo de combustível entre 15 e 23 MJ kg SV⁻¹. Os autores concluíram que esta abordagem alcança alto conteúdo de energia e contribui para limpar o ambiente e que a otimização de processos adicionais na hidrólise e a fermentação pode melhorar ainda mais o rendimento energético.

Zhang et al. (2014), avaliaram a fermentação de bioetanol e biogás, integrado ao pré-tratamento de um consórcio microbiano celulolítico. No estudo,

8 lotes de fermentação de etanol integrados com 7 lotes de fermentação de biogás foram prosseguidos sucessivamente. A água reciclada após os dois estágios de digestão anaeróbica foi reutilizada para misturar matérias-primas nos últimos 7 lotes de fermentação com etanol, enquanto apenas água da torneira foi usada no primeiro lote. Durante o processo de reciclagem dos substratos orgânicos, ácidos graxos voláteis, nitrogênio total e amônia alcançaram estados estacionários enquanto o íon total e alcalinidade revelou uma pequena tendência de diminuição com o incremento dos lotes de reciclagem. O rendimento total e a velocidade de produção de metano de cada lote de reciclagem no sistema de acoplamento proposto chegaram a 180–206 L d⁻¹ e 40–45 L CH₄ L⁻¹ d⁻¹ (litros de metano gerados por litro de volume do reator por dia) respectivamente. Além disso, o rendimento de massa total obtido pela combinação no sistema de acoplamento proposto foi de 317 g de etanol mais 68,7 g de metano por kg de mandioca e 8,3% de energia mais alta foi gerada em comparação com o sistema de fermentação de bioetanol e de acoplamento de biogás. Concluiu-se, que a inserção de um passo de pré-tratamento biológico no sistema de acoplamento proposto apresentou vantagens com grande potencial de aplicação.

Anyanwu et al. (2015), realizaram o trabalho de revisão bibliográfica com destaque para a produção de mandioca na Nigéria nas últimas duas décadas e ao mesmo tempo estimaram a quantidade de resíduos gerados no país e seu potencial como matéria prima para a produção de biocombustíveis. Destacaram também usos industriais e globais da mandioca para recomendar uma abordagem de produção sustentável na Nigéria visando atender demandas alimentares, industriais e energéticas. De acordo com os autores, a mandioca é a terceira maior fonte de carboidratos do mundo para alimentação humana e de suma importância pois seu teor de energia é de 610 kJ/100 g de peso. A mandioca é uma cultura alimentar na Nigéria, onde se produz farinha e grânulos tostados de alta qualidade. Os autores destacaram a mandioca como cultura energética em que os resíduos de sua produção podem ser utilizados para a produção de biocombustíveis como o bioetanol e biogás.

Cheng et al. (2015), investigaram os efeitos do MHAP (pré-tratamento com aquecimento por micro-ondas), e SHAP (Pré-tratamento com aquecimento a vapor), sobre as alterações microestruturais dos resíduos de mandioca. Para

determinar as propriedades físico-químicas de resíduos de mandioca após MHAP e SHAP na forma de dois estágios: processo de fermentação e fermentação de metano. Os resíduos de mandioca foram secos em estufa, moídos em malha de 0,02 mm e armazenados para uso posterior. O pré-tratamento MHAP realizado em um forno de micro-ondas obteve 5 g de resíduos de mandioca divididos em quatro reatores de politetrafluoretileno, 1,25 g de resíduos de mandioca secos foram adicionados separadamente em quatro reatores. Posteriormente foi diluído na proporção 0,05 H₂SO₄, (1,0%,v/v), ao volume combinado a 25 ml de cada reator. No aquecimento a vapor 5,0 g de resíduos de mandioca secos foram colocados em um autoclave e aquecidos a 135°C por 15 min, e depois diluído H₂SO₄ (1,0%, v / v) foi adicionado para levar o volume combinado para 100 ml. O MHAP e o SHAP são métodos eficazes para o pré-tratamento de resíduos de mandioca para melhorar a cogeração de hidrogênio e metano. O MHAP gerou numerosos microporos regulares, SHAP gerou muitos fragmentos irregulares. O MHAP causou um coeficiente de cristalinidade maior do que o SHAP, a produção de hidrogênio dos resíduos de mandioca com o MHAP foi superior ao do SHAP, demonstrando que o rendimento subsequente de metano em comparação com a energia total a eficiência de conversão aumentou para 24,7%.

Widodo et al. (2015), realizaram um estudo histórico sobre a cultura da mandioca na Indonésia analisando sua forma de plantio, sua utilização na alimentação humana, animal e a geração de energia a partir dos seus resíduos. De acordo com os autores, a produção atual de mandioca ainda não é capaz de atender a demanda mundial, indicando a redução de 1,5 milhões ha para 1,3 milhões ha. O desenvolvimento da mandioca na Indonésia foi apresentado a partir de estudos na perspectiva histórica, análises descritivas de abordagens dedutiva e indutiva foram adotadas para compartilhar descobertas. A mandioca não é uma cultura nativa da Indonésia, foi introduzida durante o início do colonialismo. Com base nos resultados registrados e discussão, o potencial biológico da mandioca, segundo os autores, fornece a solução da civilização humana especialmente no que diz respeito ao fornecimento de alimentos, ração animal e combustível. Alimentos e fertilizantes podem ser desenvolvidos no processamento da cadeia produtiva visando aumentar o valor adicional da mandioca para uma agricultura sustentável. O biogás produzido a partir da

mandioca em associação com a pecuária pode beneficiar a muitos a partir de seu uso como energia renovável, evitando a emissão de metano e a diminuição do aquecimento global.

Jijai et al. (2015), estudaram o efeito dos tamanhos dos grânulos de fábrica de mandioca, fábrica de frutos do mar e de um moinho de óleo de palma sobre o desempenho dos reatores UASB para tratamento de águas residuárias da produção de mandioca usando modelos cinéticos. Os resultados preliminares deste trabalho podem ser valiosos para o projeto e operação de usinas de biogás contínuas. Foram utilizados neste estudo três reatores UASB de escala laboratorial idênticos em cinco tempos de retenção hidráulica (TRH). Os reatores UASB eram cilíndricos em sua forma com 100 cm de altura, 5,4 cm de diâmetro interno e 2,06 L de volume de trabalho. A alimentação dos reatores foi realizada por bomba peristáltica, sendo os mesmos operados continuamente com tempos de retenção hidráulica de 5, 4, 3, 2 e 1 dias. As taxas de carregamento orgânico correspondentes foram de 3,76; 4,7; 6,27; 9,4 e 18,8 kg DQO m³d⁻¹, respectivamente. A Demanda Química de Oxigênio (DQO), Nitrogênio Total Kjhdhal (NTK), Fósforo Total (FT), Sólidos Totais (ST), Sólidos Voláteis (SV), Suspensos (SS), Sólidos Suspendidos Voláteis (SSV), alcalinidade, Ácidos Graxos Voláteis (AGV) e o pH foram analisados. A DQO estacionária diminuiu de 91,49% para 43,23% no reator R1, 89,36% para 45,13% no reator R2 e 87,23% a 32,69% no reator R3, com tempos de retenção hidráulica decrescentes de 5 dias a 1 dia. O reator R1 usou apenas grânulos da fábrica de mandioca com tamanhos médios de 1,5 a 1,7 mm que resultou em maior remoção de DQO e produção de biogás. Para os reatores R1 e R2, a eficiência de remoção de DQO tornou-se menor que 60% em 1 dia de TRH de 18,8 kg DQO m⁻³d⁻¹, enquanto que para R3 a eficiência de remoção de DQO tornou-se menor que 60% em 2 dias de TRH com de 9,4 kg DQO m⁻³d⁻¹. Além disso, como os TRHs diminuíram de 5 para 1 dias, o pH nos três reatores diminuiu de 7,2 para 5,8. As medidas de alcalinidade indicaram que a acidogênese ocorreu mais rapidamente que a acetogênese e a metanogênese. Os resultados deste estudo mostraram que os tamanhos dos grânulos afetaram o desempenho na remoção de DQO e produção de biogás em reatores UASB. Os autores constataram também que as eficiências de remoção de DQO e a produção de biogás diminuíram com a diminuição do TRH.

Andrade et al. (2016), avaliaram o processo de codigestão anaeróbica de dejetos de vacas leiteiras, aves poedeiras, suínos e ovinos com manipueira em codigestor anaeróbio semi-contínuo. O experimento foi realizado durante a estação chuvosa, com temperatura média era de 29,02 °C. Foram utilizados oito biodigestores semi-contínuo com volume útil de 7,8 L de substrato em fermentação operados com tempo de retenção hidráulica de 30 dias. Este ensaio foi realizado em duas fases, que consistiu de 35 dias de início com substrato que continham 2% de sólidos totais (ST) e 90 dias de alimentação diária com substrato que continham 4% de (ST). Todos os digestores foram mantidos em temperatura ambiente alojados livres de luz solar e chuva. Os substratos utilizados eram formados por dejetos de bovinos de leite, ovinos, aves e suínos codigeridos com manipueira. Utilizou-se na fase inicial do experimento dejetos frescos de vacas leiteiras, ovelhas, frango de corte e suínos sendo os digestores alimentados diariamente com manipueira a uma concentração média de 5,5 % de sólidos totais (ST), com pH de 4,87, concentração total de amônia de 175 mg L⁻¹ de manipueira (10%, peso) e bicarbonato de sódio (NaHCO₃) (0,5%, peso/peso). O rendimento de biogás foi calculado usando dados de produção de biogás de cada digestor e a quantidade de sólidos voláteis (SV) adicionado. As produções médias de biogás acumuladas semanalmente foram de 0,00676, 0,1167, 0,01515 e 0,01856 m³, para substratos formados por dejetos de vacas leiteiras, ovinos, aves e suínos codigeridos com manipueira, respectivamente. A produção de biogás para os respectivos substratos foram 0,122, 0,275, 0,535 e 0,843 m³ kg⁻¹ de (SV). As maiores produções de biogás foram obtidas na codigestão anaeróbia de dejetos de suínos com 10 % volume de manipueira.

Glanpracha e Annachatre (2016), avaliaram a eficácia da codigestão anaeróbia da polpa de mandioca contendo cianeto com dejetos suíno variando a taxa de carregamento orgânico em escala laboratorial com reator agitado de fase única e alimentado de forma semi-contínua. Os autores investigaram o efeito do cianeto presente na polpa de mandioca na codigestão com dejetos suíno sob várias taxas de carregamento. O digestor foi operado com o substrato com relação C/N de 35. A inicialização do digestor foi aos 60 dias com carga de 0,5 kg SV m⁻³ d⁻¹. Subsequentemente, o carregamento para o digestor foi aumentado gradualmente de 2 para 9 kg SV m⁻³ d⁻¹. O desempenho do digestor foi estável no carregamento entre 2 e 6 kg SV m⁻³ d⁻¹ com uma remoção média de sólidos

voláteis e rendimento de metano de 82% e 0,38 m³ kg SV⁻¹, respectivamente. A solubilização do material particulado não ocorreu. O cianeto presente na polpa da mandioca foi degradado com sucesso, indicando que o lodo anaeróbio no digestor foi bem aclimatado ao cianeto. Os resultados mostram que a polpa de mandioca pode ser digerida com sucesso anaerobicamente com dejetos suíno como substrato sem qualquer efeito inibitório do cianeto.

Kuczman et al. (2017), avaliaram duas condições operacionais em um reator tubular horizontal piloto instalado em uma indústria de fécula de mandioca: ausência e presença de agitação. O reator foi escavado no solo com as dimensões de 10,80 m de comprimento superior, 9,80 m de comprimento inferior, 2,30 m de largura superior, 1,30 m de largura inferior e 2,10 m de profundidade. O volume total do reator foi de 33,6 m³. A vedação da câmara e a construção do gasômetro foi realizada com geomembrana de polietileno de alta densidade com 1,25 mm de espessura. Uma cama de 45 sacos contendo 9.000 peças de bambu, medindo 15 cm de comprimento e 4 cm de diâmetro, foi utilizado como meio de suporte para os microorganismos. O reator foi inoculado com lodo de lagoas anaeróbicas e alimentado com a seguinte proporção volumétrica de substratos: 10,0 : 22,6 : 1,0 (lodo: água: resíduos de mandioca), sendo avaliado o TRH de 7,0 dias. As análises para pH, DQO, SV (sólidos voláteis) e AV/AT (acidez volátil/alcalinidade total) foram realizadas de acordo com a metodologia APHA. Mesmo com uma redução de temperatura entre os níveis operacionais de 2,3 °C, uma maior redução de DQO foi evidente. A agitação melhorou o desempenho do reator piloto, promovendo o contato da biomassa-substrato, reduzindo o encrustamento no fundo e superfície, contribuindo para o fluxo de efluentes e introduzindo energia térmica na biomassa. A agitação do reator manteve a redução de DQO e a produção de biogás, reduzindo a relação AV/AT, de forma que a mesma se mostrou vantajosa em termos de estabilidade operacional.

Madeira et al. (2017), avaliaram e quantificaram valores médios de parâmetros ambientais da produção de hidrogênio a partir do biogás obtido de águas residuárias de mandioca com diferentes composições. No Brasil, os efluentes do processamento de mandioca não são tratados causando sérios problemas ambientais. O método utilizado foi baseado em uma simulação computacional do processo de produção de hidrogênio, onde os passos para

realizar a simulação foram os seguintes: (i) definição dos componentes químicos do biogás - metano, hidrogênio, monóxido de carbono, dióxido de carbono e vapor d'água; (ii) escolha do modelo termodinâmico apropriado para o estudo. O processo de produção de hidrogênio foi avaliado considerando se o resultado do biogás obtido pela digestão de água residuárias de mandioca é ou não poluidor. A produção de hidrogênio a partir do biogás obtido de efluentes de mandioca é uma tecnologia inovadora e contribui para a mitigação do impacto ambiental. Foi utilizado um biodigestor anaeróbio com separação de fases produzindo um biogás com concentração de 71,35% de CH₄ e 28,65% de CO₂. O sistema de digestão anaeróbia piloto contínuo consistiu de dois decantadores de 500L, em série, seguidos por um reator acidogênico de 1.000L e um reator metanogênico de 3.000L. Devido a sua concentração e possibilidade de produção de energia com baixa emissão de gases, foi obtido no processo 1 maior concentração de CH₄ sendo também o menos poluidor por kg de H₂ apresentando composição de 97,14% de CH₄ e melhor eficiência energética ao passo que o processo 4 apresentou 74,25% de CH₄ com pior eficiência energética. Dessa forma, ficou determinado que o valor médio do indicador de poluição e eficiência do biogás produzido a partir de efluentes de mandioca demonstraram que a tecnologia propõe uma contribuição positiva para reduzir a emissão de gases poluentes especialmente os de efeito estufa (CO₂), agregando-se valor a cadeia produtiva da mandioca.

Sánchez et al. (2017), realizaram o experimento sobre a transformação de lagoas de tratamento de efluentes em lagoas cobertas. O processo industrial de produção da fécula de mandioca gera efluentes muito poluentes que precisam ser tratados antes da descarga. Uma série de experiências bem-sucedidas sobre a transformação de lagoas de tratamento em lagoas cobertas foram conduzidas nos últimos anos no Brasil, provando que o uso de digestores anaeróbicos poderia tornar a indústria mundial da mandioca mais lucrativa. A abordagem da economia circular foi utilizada para adicionar o equilíbrio de gases de efeito estufa, água e uso da terra à avaliação de um conjunto de alternativas de resíduos como recursos para esse processo industrial específico. Os resultados apontam para a conveniência de atualizar a solução de lagoas cobertas para uma biorefinaria de resíduos mais completa que não apenas se concentre na geração de energia elétrica, mas também recupere o calor do processo e o

biofertilizante como subprodutos. A cogeração (calor e energia elétrica) se mostrou bastante atraente para a recuperação de recursos desse resíduo agrícola. Verificou-se também que a maior eficiência que caracterizou a cogeração leva ao menor nível de emissões de gases de efeito estufa.

Carvalho et al. (2018), realizaram experimento revendo alguns aspectos sobre a produção e processamento de mandioca, introduzindo conceito de cultivo de microalgas de amostras ambientais. Avaliaram a cultura de *Chlorella minutissima*, *Spirulina platensis* e microalgas nativas em águas residuais de processamento de mandioca. O processamento de mandioca tem uma alta DQO chegando a 56 g L⁻¹ com altas concentrações de nutrientes químicos. Os autores propuseram a utilização dos resíduos sólidos de mandioca em produção de pequena escala para compostagem e ração animal, ao passo que os resíduos líquidos podem ser degradados em lagoas simples ou biodigestores. Comprovaram que os resíduos do processamento possuíam DQO de 6 a 56 g L⁻¹ com uma relação de C N P (carbono, nitrogênio, fósforo), em torno de 330: 30: 1 em base molar com um poder poluidor enorme. A mandioca possui cianeto na forma de glicosídeos cianogênicos, principalmente linamarina (95%) que é prejudicial à saúde animal e humana. O uso direto como fertilizante deve ser limitado, uma vez que pode levar a efeitos fitotóxicos. O mesmo vale para alimentação animal. As microalgas são capazes de crescimento autotrófico (em que se produz seu próprio alimento), e heterotrófico (necessita de obter matéria orgânica do meio externo). Dentre as espécies consideradas para o cultivo utilizando resíduos do processamento de mandioca, duas foram selecionadas: *Spirulina platensis* e *Chlorella minutissima*. O crescimento das microalgas neste resíduo foi avaliado como uma alternativa para a integração em uma biorrefinaria de mandioca para produção de alimentos e energia. O experimento realizado com as microalgas *Chlorella* e *Spirulina* constatou uma redução de 89-99% na DQO das águas residuárias da produção de mandioca, bem como a redução de fosfato, nitrato e cianeto.

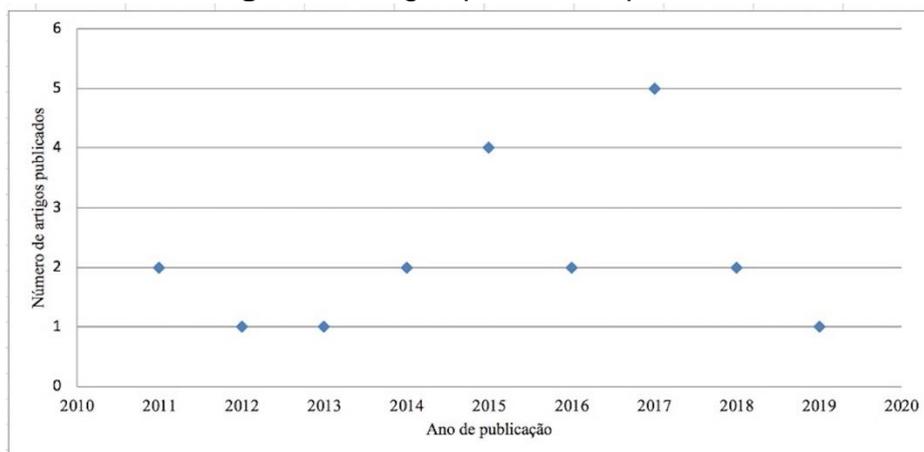
Jiraprasertwong et al. (2019), desenvolveram um processo de manta de lodo anaeróbio de fluxo ascendente de três estágios maximizando a produção de H₂ e CH₄ a partir de águas residuárias da produção de mandioca, fornecendo condições ambientais aos três biorreatores para as fases da biodigestão anaeróbia. Os três biorreatores foram construídos a partir de vidro borossilicato

com camisa de água e envoltos com folhas de borracha para inibir a atividade fotossintética de bactérias e algas. Os volumes de retenção líquidos foram 4, 10 e 24 L para o primeiro, segundo e terceiro biorreatores, respectivamente. Cada biorreator teve um espaço de cabeça de cerca de 1, 1,5 e 5 L, respectivamente. O experimento foi conduzido à temperatura mesofílica de $37 \pm 1^\circ \text{C}$ usando um banho de aquecimento circulante para fluir através dos revestimentos de água dos três biorreatores. A alimentação dos biorreatores foi realizada a razão com DQO variando de 5 a $18 \text{ kg m}^{-3}\text{d}^{-1}$. No primeiro biorreator o pH foi definido em 5,5, enquanto que nos outros dois biorreatores o pH não foi controlado. Para uma taxa de carga de DQO ótima de $15 \text{ kg m}^{-3}\text{d}^{-1}$, o sistema proporcionou o maior nível de remoção de DQO (92,5%) e os rendimentos de H_2 e CH_4 de $0,43 \text{ mL H}_2 \text{ g DQO}^{-1}$ e $328 \text{ mL de CH}_4 \text{ g DQO}^{-1}$, respectivamente. A produtividade muito elevada de CH_4 com baixa produção de H_2 resultou do lodo reciclado do terceiro biorreator para o primeiro e segundo biorreatores. O desempenho do processo do sistema UASB de três estágios em termos de taxa de remoção de DQO foi considerada ótima e o rendimento total de energia foi muito maior do que o de processos anaeróbios de um e dois estágios.

Nesta revisão foram analisados trabalhos relevantes realizados no Brasil e no exterior sobre o aproveitamento dos resíduos do processamento da mandioca. Os trabalhos apresentaram parâmetros operacionais da biodigestão anaeróbia, como TRH, pH, DQO, DBO, acidogênese e metanogênese, temperatura, agitação e outros, assim como aspectos experimentais modelos de biodigestor, variedade de substratos que podem ser utilizados na produção de biogás e diferentes proporções de mistura. A maioria dos trabalhos apresentou resultados positivos quanto à produção de biogás a partir de diferentes substratos para biodigestão anaeróbia, com ênfase na manipueira.

Dados bibliométricos

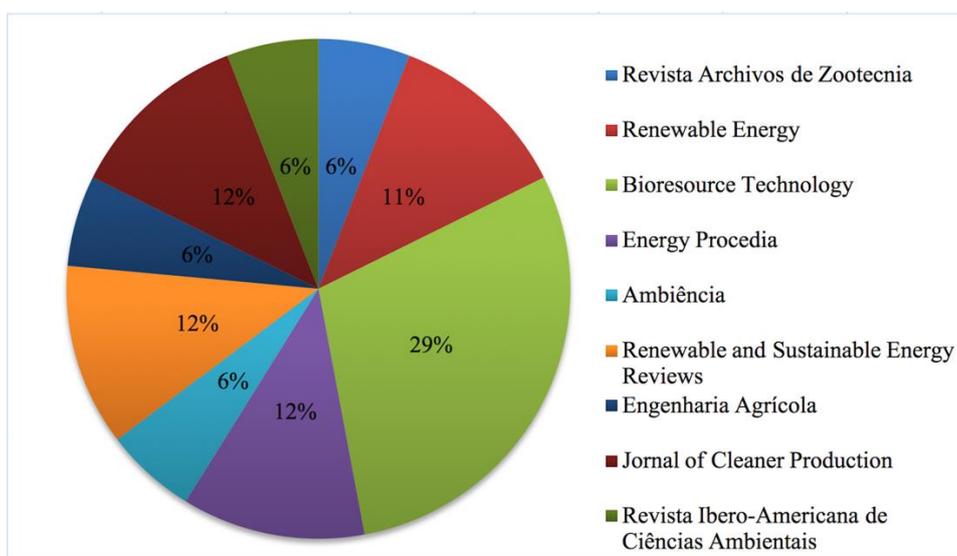
A Figura 2 mostra os dados bibliométricos referentes ao ano de publicação dos trabalhos analisados, abrangendo o período de 2000 a 2019, com maior expressividade os artigos de 2015, 2014 e 2017.

Figura 2. Artigos publicados por ano

Fonte: Autores (2020)

A Figura 3 mostra as revistas nacionais e internacionais e universidades em que os trabalhos foram publicados.

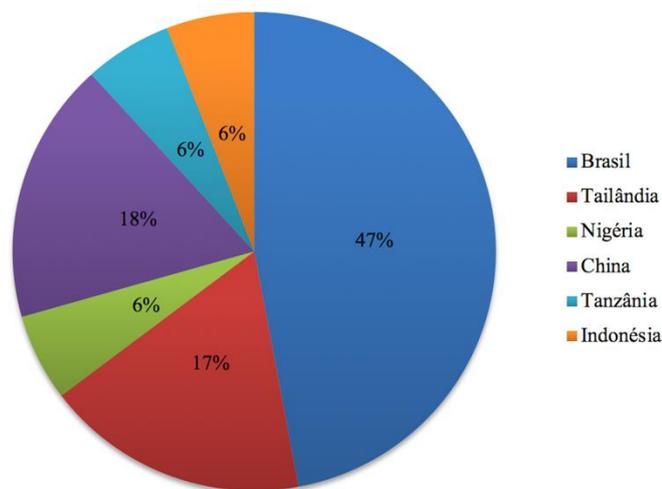
Foram contabilizados 9 diferentes veículos em que os trabalhos foram publicados. O periódico *“Bioresource Technology”* publicou 5 artigos o que correspondeu a 29%. A importância do tema produção de biogás a partir dos resíduos de mandioca pode ser aferida pela qualidade dos periódicos, com grande fator de impacto, em que os trabalhos foram publicados.

Figura 3. Revistas científicas em que os trabalhos foram publicados

Fonte: Autores (2020)

A Figura 4 mostra os países em que os trabalhos foram desenvolvidos.

Figura 4. País de origem dos trabalhos



Fonte: Autores (2020)

Observa-se na Figura 4 que 47% dos trabalhos foram desenvolvidos no Brasil, seguido por China com 18%, Tailândia com 17%, Nigéria, Tanzânia e Indonésia com 6%. Os países em que os trabalhos foram desenvolvidos coincide com os maiores produtores mundiais de mandioca, com exceção da China que devido a fatores geopolíticos e econômicos tem estudado o tema. A distribuição geográfica das pesquisas denota a preocupação dos pesquisadores na resolução dos problemas advindos dos resíduos oriundos da atividade.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho comprovou a pertinência dos estudos desenvolvidos sobre o tema, haja vista a importância da produção de mandioca como atividade econômica e garantidora da segurança alimentar de milhões de pessoas, a possibilidade de geração de energia contribuir para melhoria da qualidade de vida das pessoas no entorno dos arranjos produtivos e para agregar valor à atividade. Os trabalhos avaliados nesta revisão bibliográfica foram publicados entre os anos 2011 e 2019, sendo o período entre 2014 e 2017 mais artigos foram publicados. Foram contabilizadas 9 revistas científicas em que os

trabalhos foram publicados. O periódico *“Bioresource Technology”* foi o que teve maior número de artigos publicados o período. Considerando os países em que os trabalhos foram desenvolvidos, observou-se que a maioria ocorreu nos maiores produtores mundiais de mandioca.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, G.V.B. **Biodigestão Anaeróbica na Suinocultura**. Trabalho de Conclusão de Curso (Medicina veterinária) - Centro Universitário das Faculdades Metropolitanas Unidas, 54p, 2008.

AL SEADI, T. **Good Practice in Quality Management of AD residues from biogas production**: Task 24 og AEA Technology Environment. 2001.

ANDRADE, M. A. N., RANZI, T. J. D., MUNIZ, R. N., SILVA, L. G. E. S., ELIAS, M. J. **Biodigestores rurais no contexto da atual crise de energia elétrica brasileira e na perspectiva da sustentabilidade ambiental**. In Proceedings of the 4th Encontro de Energia no Meio Rural, 2002, Campinas (SP).

ANDRADE, W. R., XAVIER, C. A., COCA, F. O. C. G., ARRUDA, L. D. O., SANTOS, T. M. B. **Biogas production from ruminant and monogastric animal manure co-digested with manipueira**. Revista Archivos de Zootecnia, 12(251): 375-380, 2016.

ANYANWU, C. N., IBETO, C. N., EZECHA, S. L., OGBUAGU, N. J. **Sustainability of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) as industrial feedstock, energy and food crop in Nigeria**. Renewable Energy, 81: 745-752, 2015.

BARBOSA, G.; LANGER, M. **Uso de biodigestores em propriedades rurais: uma alternativa à sustentabilidade ambiental**. Unoesc & Ciência - ACSA, 2(1): 87-96, 2011.

CALDEREIRO, G.M.B. **Caracterização da digestão de resíduos agroindustriais em biodigestor de fluxo contínuo operado em escala real**. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 90 p, 2015.

CARVALHO, J. C., BORGHETTI, I. A., CARTAS, L. C., WOICIECHOWSKI, A. L., SOCCOL, V. T., SOCCOL, C. R. **Biorefinery integration of microalgae production into cassava processing industry: Potential and perspectives**. Bioresource Technology, 247: 1165-1172, 2018.

CHENG, J., LIN, R., DING, L., SONG, W., LI, Y., ZHOU, J., CEN, K. **Fermentative hydrogen and methane cogeneration from cassava residues**:

Effect of pretreatment on structural characterization and fermentation performance. *Bioresource Technology*, 179: 407-413, 2015.

COSTA, M. S. S. M., LUCAS JR., J., COSTA, L. A. M., ORRICO, A. C. A. **A highly concentrated diet increases biogas production and the agronomic value of young bull's manure.** *Waste Management*, 48: 521-527, 2016.

GLANPRACHA, N.; ANNACHHATRE, A.P. **Anaerobic co-digestion of cyanide containing cassava pulp with pig manure.** *Bioresource Technology*, 214: 112-121, 2016.

JIJAI, S., SRISIWAN, G., O-THONG, S., ISMAIL, N., SIRIPATANA, C. **Effect of Granule Sizes on the Performance of Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) Reactors for Cassava Wastewater Treatment.** *Energy Procedia*, 79: 90-97, 2015.

JIRAPRASERTWONG, A., MAITRIWONG, K., CHAVADEJ, S. **Production of biogas from cassava wastewater using a three-stage upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor.** *Renewable Energy*, 130: 191-215, 2019.

KUCZMAN, O., GOMES, S. D., TAVARES, M. H. F., TORRES, D. G. B., ALCÂNTARA, M. S. **Produção específica de biogás a partir de manipueira em reator de fase única.** *Engenharia Agrícola*, 31(1): 143-149, 2011.

KUCZMAN, O., TAVARES, M. H. F., GOMES, S. D., GUEDES, L. P. C., GRISOTTI, G. **Effects of stirring on cassava effluent treatment in an anaerobic horizontal tubular pilot reactor with support medium – A Review.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77: 984-989, 2017.

MADEIRA, J. G. F., BOLOY, R. A. M., DELGADO, A. R. S., LIMA, F. R., COUTINHO, E. R., PEREIRA FILHO, R. C. **Ecological analysis of hydrogen production via biogas steam reforming from cassava flour processing wastewater.** *Journal of Cleaner Production*, 162: 709-716, 2017.

MAO, C., FENG, Y., WANG, X., REN, G. **Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 45, p. 540-555, 2015.

MONTORO, S.B. **Co-digestão de batata doce com dejetos de bovinos leiteiros: uma avaliação técnica e econômica para produção de energia e biofertilizante.** Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônomicas da Unesp, 91p, 2017.

MOSHI, A. P., CRESPO, C. F., BADSHAH, M., HOSEA, K. M. M., MSHANDETE, A. M., ELISANTE, E., MATTIASSON, B. **Characterisation and evaluation of a novel feedstock, *Manihot glaziovii*, Muell. Arg, for production of bioenergy carriers: Bioethanol and biogas.** *Bioresource Technology*, 172: 58-67, 2014.

MUGNAINI, R.; JANNUZZI, P. M.; QUONIAN, L. **Indicadores bibliométricos da produção científica brasileira: uma análise a partir da base Pascal**. *Ciência da Informação*, 33(2): 123-131, 2004.

PALHARES, J. C. P. **Biodigestão anaeróbia de dejetos de suínos: aprendendo com o passado para entender o presente e garantir o futuro**. Disponível em: < https://www.agrolink.com.br/colunistas/coluna/biodigestao-anaerobia-de-dejetos-de-suinos--aprendendo-com-o-passado-para-entender-o-presente-e-garantir-o-futuro_385188.html >. Acesso em: 18 mai. 2020.

RESEARCH AND MARKETS. **Global Cassava Processing Market Report 2019: Industry Trends, Share, Size, Growth, Opportunity and Forecasts 2011-2018 & 2019-2024**. Disponível em: <https://www.researchandmarkets.com/research/989m6k/global_cassava?w=12>, Acesso em: 18 mai. 2020.

SALMINEN, E.; RINTALA, J. **Anaerobic digestion of organic solid poultry slaughterhouse waste – a review**. *Bioresource Technology*, 83 (1): 13-26, 2002.

SÁNCHEZ, A. S., SILVA, Y. L., KALID, R. A., COHIM, E., TORRES, E. A. **Waste bio-refineries for the cassava starch industry: New trends and review of alternatives**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73:1265-1275, 2017.

SANTOS A. **Usos e impactos ambientais causados pela manipueira na microregião sudoeste da Bahia-Brasil**. In: LUZON JL; CARDIM M. (Org.). *Problemas sociales y regionales em América Latina: estudo de casos*. Barcelona: Universitat de Barcelona, p. 11-25, 2009.

SILVA, I.P.M. **Sistema de Agitação Para Digestores Anaeróbios**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial) - Universidade de Aveiro, 50 p, 2009.

SILVA, C. O., CEZAR, V. R. S., SANTOS, M. B., SANTOS, A. S. 2013. **Biodigestão anaeróbia com substrato formado pela combinação de esterco ovino caprino, manipueira e biofertilizante**. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, 4 (1): 88-103, 2013.

SUZUKI, A. B. P., FEIDEN, A., FERNANDES, D. M., MARTINS, G. I., FARIA, R. A. P. **Utilização de manipueira juntamente com sólidos da cama de aviário em biodigestores para geração de biogás**. *Revista Ambiente*, 8 (3): 809-820, 2012.

WIDODO, Y.; WAHYUNINGSIH, S.; NEWBY, J. **Fuelling Cassava Development to Meet the Greater Demand for Food and Bio-fuel in Indonesia**. *Energy Procedia*, 60: 386-394, 2015.

FERRAREZ, PINTO E MOREIRA, 2020.

ZHANG, Q., HE, J., TIAN, M., MAO, Z., TANG, L., ZHANG, J., ZHANG, H. **Enhancement of methane production from cassava residues by biological pretreatment using a constructed microbial consortium.** Bioresource Technology, 100(9): 8899-8906, 2011.

ZHANG, Q., ZHANG, L., KONG, L., YUAN, G., ZHU, X., LIU, H., WANG, Y., ZHOU, F. **Establishment and assessment of a novel bioethanol and efficient biogas coupling fermentation system integrated with the pretreatment of a cellulolytic microbial consortium.** Journal of Cleaner Production, 83: 142-150, 2014.

.