

Resíduos sólidos urbanos: potencial fonte de carbono para degradação microbiana e produção de biogás**Urban solid waste: potential carbon source for microbial degradation and biogas production**

DOI:10.34117/bjdv5n8-052

Recebimento dos originais: 10/07/2019

Aceitação para publicação: 20/08/2019

Angela Cristina Mélo-Schlub

Tecnóloga em Gestão Ambiental pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Campus Recife, DASS/CGAM.

Av. Prof. Luiz Freire, 500

Cidade Universitária Recife, PE – Brasil

E-mail: cristinaschlub@gmail.com

Leonor Alves de Oliveira da Silva

Doutora em Microbiologia Aplicada pela Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho. Professora Adjunta da Universidade Federal de Pernambuco

Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Ciências Biológicas, Departamento de Antibióticos.

Rua Prof. artur de Sá s/n

Cidade Universitária Recife-PE – Brasil

E-mail: laodls@yahoo.com.br

Sávio Henrique de Barros Holanda

Engenheiro Ambiental pelo Centro Universitário Maurício de Nassau, Mestre e Doutorando em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Pernambuco

Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil.

Av. Acad. Hélio Ramos, s/n - Dep. Eng. Civil - CTG - UFPE

Cidade Universitária Recife, PE – Brasil

E-mail: savioholanda@hotmail.com

Alessandra Lee Barbosa Firmo

Engenheira Química pela Universidade Federal de Pernambuco, Mestre e Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Pernambuco. Professora do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Campus Recife, DASS/CGAM.

Av. Prof. Luiz Freire, 500

Cidade Universitária Recife, PE – Brasil

E-mail: alessandra.lee@gmail.com

José Fernando Thomé Jucá

Doutor em Engenharia Civil/Geotecnia pela Universidad Politécnica de Madrid/Espanha.
Professor Titular da Universidade Federal de Pernambuco. Coordenador do Grupo de
Resíduos Sólidos da UFPE (GRS/UFPE).

Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia
Civil.

Avenida Acadêmico Hélio Ramos, s/n
Cidade Universitária Recife, PE – Brasil
E-mail: jucah@ufpe.br

RESUMO

O planeta urge por soluções viáveis para evitar e/ou mitigar as consequências nefastas da produção de resíduos sólidos e também da sua disposição inadequada. As situações de desequilíbrio que o mundo vive são percebidas através das mudanças climáticas, das doenças provocadas pela falta de saneamento básico adequado, pela pobreza extrema, pela contaminação dos recursos hídricos, pela poluição do solo e do ar atmosférico à níveis inimagináveis causando problemas econômicos, sociais e ecológicos. Apresentar uma solução simples com retorno financeiro, respeitando os pilares da sustentabilidade, capaz de impelir os órgãos públicos e privados à investir nesta pesquisa é o foco principal. Utilizando a própria biocenose encontrada no resíduo sólido urbano envelhecido (8 anos) para tratá-lo e torná-lo fonte de dividendos, ao mesmo tempo evitando o desembolso nos gastos paliativos para a sociedade, é o objetivo concreto do estudo. Criação e inoculação em teste laboratorial de Potencial Bioquímico de Metano (BMP) de um consórcio bacteriano hidrolítico nativo do próprio resíduo para degradá-lo, cuja produção de biogás é monitorada e avaliada é o expediente usado. A produção de biogás e principalmente do metano superou as expectativas, pois apresentou em tempo reduzido, uma produção de gás metano 66-70 %. Palavras-chave: consórcio bacteriano, resíduo sólido urbano, enzimas, metano, biogás.

Palavras-chave: consórcio bacteriano, fermentação anaeróbia, enzimas, energia renovável.

ABSTRACT

The planet is pressing for viable solutions to avoid and / or mitigate the harmful consequences of solid waste production and its inadequate disposal. The situations of imbalance that the world is experiencing are demonstrated through climate change, diseases caused by lack of adequate basic sanitation, extreme poverty, contamination of water resources, soil and atmospheric air pollution at unimaginable levels causing economic problems, Social and ecological. Presenting a simple solution with financial return, respecting the pillars of sustainability, able to push public and private institutions to invest in this research is the main focus. Using the very biocenosis found in aged urban solid waste (8 years) to treat it and make it a source of dividends, while avoiding the disbursement of palliative spending for society, is the concrete objective of the study. Creation and inoculation in laboratory test of Biochemical Potential of Methane (BMP) from a hydrolytic bacterial consortium native to the same residue to degrade it, whose biogas and methane production are monitored and evaluated. The production of biogas and methane exceeded expectations, as it presented in a reduced time, a methane production 66-70% in an aged solid residue of 8 years.

Keywords: bacterial consortium, anaerobic fermentation, enzymes, renewable energy.

1. INTRODUÇÃO

A Cúpula das Nações Unidas para o Desenvolvimento Sustentável adotou em 2015 os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) para orientar as políticas nacionais e as atividades de cooperação internacional nos próximos quinze anos, sucedendo e atualizando os Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM) (BRASIL, 2017). O Brasil acordou 17 Objetivos e 169 metas envolvendo temáticas diversificadas, como segurança alimentar, saúde, energia, água e saneamento, cidades sustentáveis, proteção e uso sustentável dos oceanos e dos ecossistemas terrestres, crescimento econômico e tantos outros (BRASIL, 2017). Segundo LIMA (2005) o desenvolvimento populacional e industrial acarretou a crescente produção de resíduos sólidos (RSs). A disposição inadequada desses resíduos sólidos no espaço urbano é prejudicial para a saúde pública, para o meio ambiente e para a economia em geral. A disposição mais inadequada dos resíduos sólidos são os lixões, eles estão presentes em praticamente todos os países em desenvolvimento. Os lixões são responsáveis pela poluição do solo, das águas, do ar, contaminando principalmente as populações que vivem nas suas proximidades com substâncias tóxicas e cancerígenas. (ABRELPE, 2017). Alguns dos países mais pobres do mundo apresentam um crescimento populacional mais rápido e onde se encontram algumas das megacidades com seus megalixões (ISWA, 2017). Grande parte dos ODS não será alcançada sem um gerenciamento adequado dos RSU, priorizando as necessidades básicas da população. As contaminações pelos resíduos sólidos afetam diretamente o bem-estar físico, psicológico e econômico dos cidadãos. O Brasil criou a Política Nacional de Resíduos Sólidos, através da Lei 12.305/10 e outras normas ambientais para direcionar a gestão adequada dos resíduos sólidos produzidos no país. Os lixões por imposição da Lei 12.305/10 serão fechados e substituídos pelos aterros sanitários em 2018, mas falta capacidade técnica e recursos financeiros nas prefeituras para realizar a erradicação dos lixões, que não é uma tarefa fácil (ISWA, 2017). Acompanhando esta prescrição da Lei 12.305/10, a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) coordena a campanha brasileira pelo fechamento de lixões em operação, inspirado da campanha mundial da International Solid Waste Association (ISWA) lançada em 2016 (RESÍDUOS URBANOS, 2017). O desafio de adequar os lixões transformando em aterros controlados já é uma realidade brasileira. Este ajustamento do método de confinamento dos RSU mais sustentável proporciona novos desafios técnicos e financeiros, abrindo um leque de possibilidades para inovação no setor da biorremediação e da biotecnologia. Viabilizar a adaptação dos lixões a céu aberto ou aterros controlados em aterros sanitários é o objetivo

geral desta pesquisa baseada em uma solução simples, economicamente executável e inserida nos princípios da sustentabilidade. O objetivo específico para viabilizar a adequação do lixão em aterro sanitário e dos aterros existentes é a criação e a aplicação de um consórcio bacteriano hidrolítico nos resíduos sólidos urbanos para a produção do gás metano como fonte de energia elétrica e/ou térmica.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A mudança climática provocada pelo aquecimento global é o resultado do desequilíbrio do efeito estufa. O efeito estufa é um fenômeno natural do planeta Terra no qual a temperatura média é mantida pelo fluxo de raios solares que chegam e o fluxo de raios infravermelhos que são refletidos ao espaço. Os gases efeito estufa (GEEs) encontrados a 15 Km acima do solo, interagem ativamente neste processo de controle da temperatura, mantendo a temperatura média entorno de 15° C (ACTU.com ENVIRONNEMENT, 2015). Os gases de efeito estufa estão sendo emitidos na atmosfera de forma descontrolada por fontes antropogênicas ocasionando o aumento da temperatura global de 10° C em média até 2150 (ACTU.com ENVIRONNEMENT, 2015). Os efeitos das mudanças climáticas e o reconhecimento da atmosfera como bem público global gerou a criação do Regime Internacional da Mudança Climática em 1994 para minimizar os efeitos negativos dessas mudanças climáticas. Os governos que participam desse Regime se reúnem anualmente através das Conferences of the Parties (COPs) (GOMES, 2005). A COP 2015 estabeleceu medidas na tentativa de manter a temperatura mundial abaixo dos 2° C e foi ratificada em 2016 por 175 países que representam 93 % das emissões de GEEs (Le Monde, 2016). Os Estados Unidos da América anunciaram em 2017 a sua saída do acordo de Paris 2015 (G1, 2017). O Brasil é um dos países participantes da COPs, integraram os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável como norteador das políticas nacionais, tem a Lei 12.305/10 que institui o Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e outras ferramentas normativas para o gerenciamento dos resíduos sólidos e participa da Campanha do ISWA pelo fechamento dos cinquenta maiores lixões mundiais. A realidade brasileira não difere dos outros países em desenvolvimento que enfrentam a problemática gerada pela produção crescente de resíduos sólidos e sua destinação final inadequada. A população brasileira e a geração per capita de resíduo sólido urbano (RSU) apresentaram ambos o crescimento de 0,8% entre os anos de 2014 e 2015. A geração total de RSU teve um crescimento de 1,7 % nesse mesmo período de tempo (ABRELPE, 2015). Na Figura 1 estes dados são demonstrados.



Figura 1 - Geração de RSU no Brasil. Fonte: Abrelpe (2015) e IBGE (2015).

Geração de RSU no Brasil Fonte: Pesquisa ABRELPE e IBGE (2015) Existem no Brasil três tipos de destinação final mais utilizadas para os resíduos sólidos produzidos: o lixão, o aterro controlado e o aterro sanitário. A disposição final de resíduos sólidos mais inadequada é na forma de lixão. Segundo D'ALMEIDA & VILHENA (2002) os resíduos são simplesmente depositados no solo desprovidos de qualquer preparo e/ou medida de proteção ambiental ou à saúde pública. Segundo D'ALMEIDA & VILHENA (2002) O aterro controlado é outra forma de confinamento dos resíduos sólidos, cujo objetivo é minimizar os impactos ambientais e proteger a saúde pública. Os resíduos descarregados no local são cobertos por uma camada de material inerte na conclusão de cada jornada de trabalho, não dispõe de impermeabilização de base, comprometendo a qualidade das águas subterrâneas, nem apresenta sistemas de tratamento do percolado (chorume) ou do biogás gerado. O aterro sanitário é um método de disposição final de resíduos sólidos, principalmente o domiciliar, que segue os critérios de engenharia e normas operacionais específicas para um confinamento seguro em termos de controle de poluição ambiental e proteção à saúde pública (D'ALMEIDA & VILHENA, 2002). Os lixões recebem 40 % dos resíduos sólidos do planeta, só os cinquenta maiores lixões do mundo mapeados pela ISWA afetam a vida diária de 64 milhões de seres humanos. Se o aumento da urbanização e o crescimento populacional continuarem no ritmo atual, e se os lixões permanecerem funcionando, eles serão responsáveis por 8 a 10 % das emissões dos gases de efeito estufa de origem antropogênica até 2025. (ABRELPE, 2017). O Brasil tem 3.326 municípios que encaminham 30 milhões de toneladas por ano de resíduos sólidos para locais inadequados, quantidade que vem crescendo anualmente, mesmo com as normas proibitivas em vigor desde 1981 (ABRELPE, 2015). A Figura 2 relata a disposição final dos RSU coletados no Brasil entre os anos 2014 e 2015.

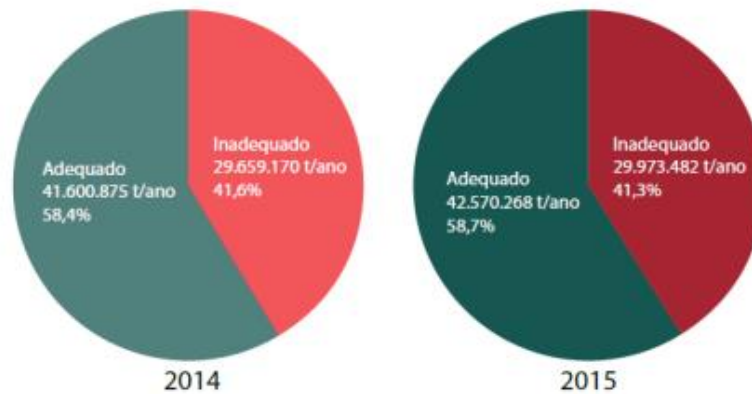


Figura 2 – Disposição final dos RSU coletados no Brasil (t/ano). Fonte: Abrelpe (2015).

Os lixões em operação no Brasil afetam mais de 76 milhões de pessoas. As unidades inadequadas recebem 82.000 toneladas por dia, cujo prejuízo anual para os cofres público gira em torno dos R\$ 3,6 bilhões para tratar dos problemas causados na saúde da população e dos cuidados ao meio ambiente, devido as consequências negativas sofrido pelo mesmo (ISWA, 2017). A Figura 3 detalha a disposição final de RSU no Brasil por tipo de destinação.

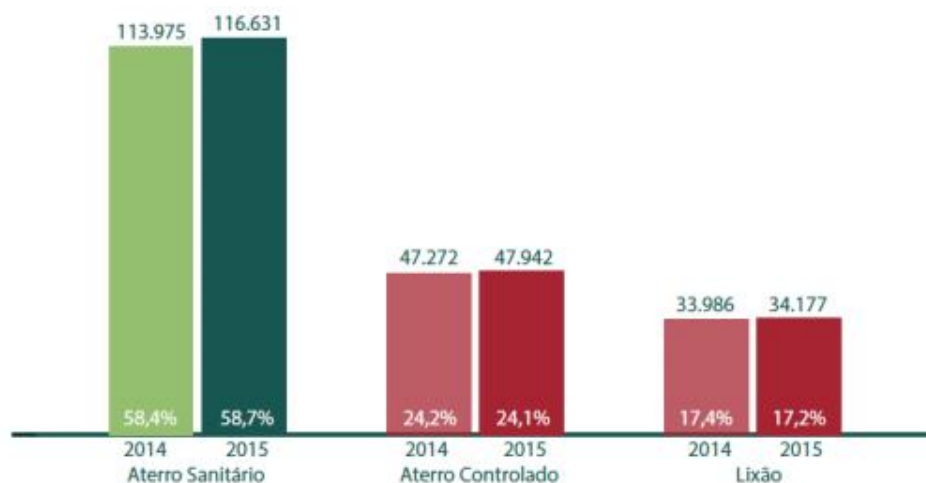


Figura 3 – Disposição final de RSU no Brasil por tipo de destinação (t/dia). Fonte: Abrelpe (2015).

A digestão dos RSUs pelos micro-organismo nos aterros sanitários produz o biogás, composto principalmente por 50-75 % de gás metano (CH₄) e 25-45% de dióxido de carbono (CO₂) (AL SEADI et al, 2008). Um grama CH₄ é entre 21 à 25 vezes mais nocivo para a camada de ozônio do que um grama de CO₂ (ABRELPE, 2013). Estes dois gases fazem parte dos cinco gases responsáveis pelo desequilíbrio do efeito estufa. Sendo o CH₄ mais nocivo que o CO₂, por isto ele é queimado e transformado em CO₂ nos aterros sanitários O biogás pode ser aproveitado através da produção de energia elétrica e térmica (PROJETO BIOGÁS,

2004). O processo de metanização nos aterros sanitários projetados pode ser alterado e acelerado através de processos e técnicas de biotecnologia (LIMA, 1986). A produção de um biorreator viabiliza a geração rápida de biogás como energia “limpa” com retorno financeiro, além de minimizar o impacto ambiental atmosférico e das águas, e o uso futuro da área de estabilização do aterro (JOHANNESSEN,1999). Vários países e empresas desenvolvem tecnologias específicas e investem no sentido de diminuir o impacto ambiental em paralelo com o retorno financeiro. (GALEFFI, 2013). O potencial energético do gás de aterro é estimado a partir do volume gerado. São necessários 670 a 800 m³ /h de biogás, com uma concentração de 50% de CH₄, para uma instalação de 1 MWe. Considerado que haverá sempre uma parcela do biogás volatilizada para a atmosfera (ABRELPE, 2013). A quantificação do metano gerado durante a decomposição dos RSUs pode ser avaliada pelo teste laboratorial de Potencial Bioquímico de Metano (BMP). Segundo DE ARAÚJO (2006) este tipo de teste avalia a biodegradabilidade anaeróbica da M.O. contida no RSU quando colocados em um meio de cultura com nutrientes que permitam o desenvolvimento de uma população de micro-organismos anaeróbios. Uma pequena quantidade de RSs é incubada anaerobiamente no BMP junto com o inóculo. O volume de biogás gerado e sua composição são monitorados regularmente (HANSEN et al., 2004). Utilizando o lodo de estação de tratamento de esgoto (ETE) como inóculo por conter uma grande quantidade de micro-organismos e matéria orgânica deve-se escolher uma quantidade mínima ótima para não encobrir os resultados da geração de gases e também não limitar a decomposição dos RSUs, produzindo poucos gases. (OWEN et al, 1979).

Tempo de adaptação ao novo tipo de substrato e a flora microbiana encontrados no BMP é fundamental, por isto o consórcio inoculado deve ser estável para um bom e rápido funcionamento do processo de degradação (SCHNÜRER & JARVIS, 2010). A primeira etapa de degradação da matéria orgânica (M. O.) é a hidrólise onde participam uma complexa comunidade de micro-organismos que produzem e excretam enzimas hidrolíticas como amilases, celulasas, xilanasas, proteases e lipases. (VITORATTO, 2004). As enzimas são proteínas altamente específicas servindo de catalisadores biológicos facilitando as reações sem serem consumidas ou transformadas durante o processo, mas aumentando a velocidade da reação de 108 a 1020 vezes quando comparada a reação espontânea (MADIGAN; MARTINKO; PARKER, 2004).

3. METODOLOGIA

A coleta, a preparação, a conservação e o fornecimento dos RSUs envelhecidos (8 anos), provenientes do aterro controlado da Muribeca/PE, para a inoculação nos BMPs foram realizadas por (HOLANDA, 2016). A separação dos RSUs aterrados teve como primeira etapa a metodologia de Kaartinen et al. (2013) e como etapa final a metodologia de Firmo (2013) (HOLANDA, 2016). O lodo de esgoto (lodo anaeróbico) do reator UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor – Reator Anaeróbico de Fluxo Ascendente) da Estação de Tratamento de Esgoto da Mangueira foi coletado, preparado e fornecido para a inoculação nos BMPs por (HOLANDA, 2016). O consórcio bacteriano inoculado no BMPs é constituído pelas linhagens bacterianas facultativas, *Bacilos subtilis* e *Alcalinas faecallis*. Estas cepas se destacaram quanto a produção de enzimas e apresentaram resultados satisfatórios nos ensaios de antagonismo (MÉLO-SCHLUB, 2017). O tipo de BMP utilizado foi o tradicional de vidro (borossilicato), servindo de digestor anaeróbico e onde foram inoculadas as linhagens bacterianas. A inoculação do consórcio bacteriano no ensaio BMP foi realizada em parceria com HOLANDA (2016), sendo a metodologia nesta etapa baseada em ALVES (2008). Para efeito comparativo quatro tipos de ensaios foram realizados, RSU + água, lodo anaeróbico, RSU + lodo e finalmente RSU + lodo + consórcio bacteriano. Na Tabela 1 tem-se o detalhamento de cada tipo de ensaio com BMP e na Figura 4 o processo de inoculação e monitoramento da produção de biogás no BMP.

Tabela 1 – Cenários de combinações de substrato e inóculos utilizados no ensaio BMP realizado.

Ensaio	Nome	Massa de RSU (g)	Volume de água (mL)	Volume de lodo (mL)	Massa lodo (gS)	Volume de Consórcio (mL)
RSU + água	S1, S2, S3	5	50	0	0	0
Lodo anaeróbico	S4, S5, S6	0	0	50	2,51	0
RSU + lodo	S7, S8, S9	5	0	50	2,51	0
RSU+lodo+consórcio	S10, S11, S12	5	0	25	1,25	25

Fonte: MÉLO-SCHLUB (2016).

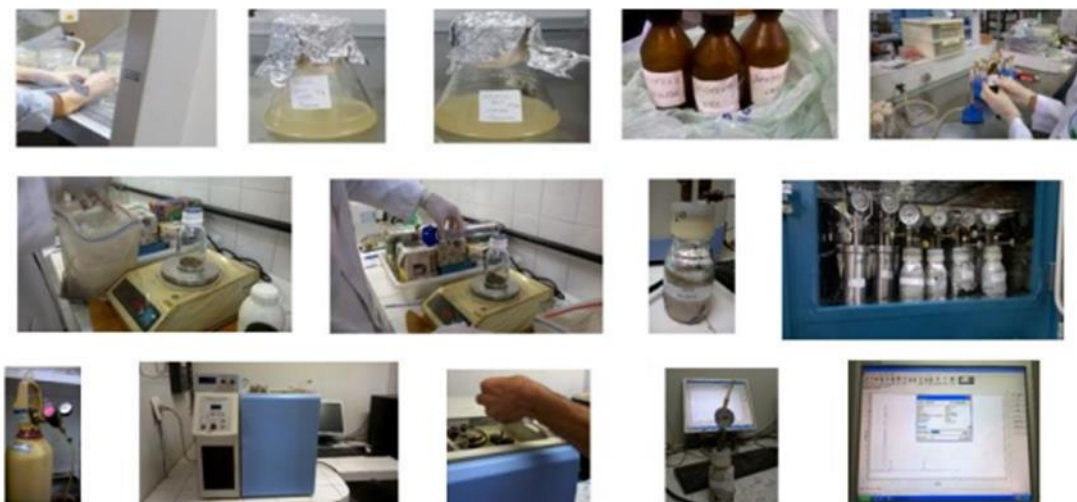


Figura 4 – Etapas dos processos de desenvolvimento do consórcio de microrganismos, inoculação nos biorreatores BMP, monitoramento e análise quantitativa dos gases metano e dióxido de carbono presentes. Fonte: MÉLO-SCHLUB (2016).

O biogás obtido durante os 106 dias nos BMPs foi monitorado por HOLANDA (2016) e analisado periodicamente através do Cromatógrafo Gasoso APPA GOLD TCD/FID. A Concentração dos dois componentes do biogás injetado no cromatógrafo (CH₄ e CO₂) foi mensurada pelo Sistema de Aquisição de Dados Cromatográficos N2000 Chromatostation.

4. RESULTADOS

Os resultados obtidos da geração de biogás durante a degradação do RSU foram representados em forma de gráficos (taxa, volume e potencial) revelando a produção de biogás e de metano. A taxa de geração de biogás é a geração diária de biogás (FIRMO, 2013). A média entre as réplicas foi realizada para obter a taxa de geração de biogás e de metano. No gráfico da taxa de geração de biogás, representado na Figura 5, a produção de biogás apresentou um grande pico no primeiro dia de inoculação nos BMPs. Do segundo dia em diante houve o decréscimo da cinética (degradação da matéria orgânica) microbiológica do substrato envelhecido e conseqüentemente a diminuição da produção do biogás em todos os BMPs. Nos BMPs RSU + Lodo + CM (Consórcio Microbiano = Consórcio Bacteriano), o primeiro dia, a degradação atingiu o seu maior pico (35 NmL/dia), depois deste dia a degradação diminuiu rapidamente, chegando no sétimo dia à 7,07 NmL/dia. O decréscimo de degradação provocou a queda de 79,80% da geração de biogás. No gráfico da taxa de geração de metano, representado na Figura 6, a curva produzida pela taxa de geração de metano dos BMPs nos ensaios RSU + Lodo + CM demonstra o comportamento da digestão do substrato

nos BMPs pelo consórcio bacteriano inoculado. A primeira fase de degradação da M. O., a hidrólise, foi estimulada pela adição do consórcio bacteriano formado por bactérias hidrolíticas. Neste primeiro dia, os BMPs continham uma grande quantidade de M. O. e a presença de O₂, servindo de substrato e de combustível, respectivamente para estas bactérias. As bactérias hidrolíticas produziram CO₂ e substratos menos complexos para as bactérias acidogênicas, assim estimulado o processo de degradação nas etapas seguintes fornecendo às bactérias metanogênicas meios mais favoráveis para se desenvolver e produzir mais metano. A produção do metano chegou ao seu ápice em pouco tempo em torno do 16º e 20º dia, diminuindo em seguida, progressivamente até a sua estabilização. A geração de CH₄ foi superior às outras três condições sem o consórcio bacteriano (RSU + Lodo, RSU + H₂O e Lodo).

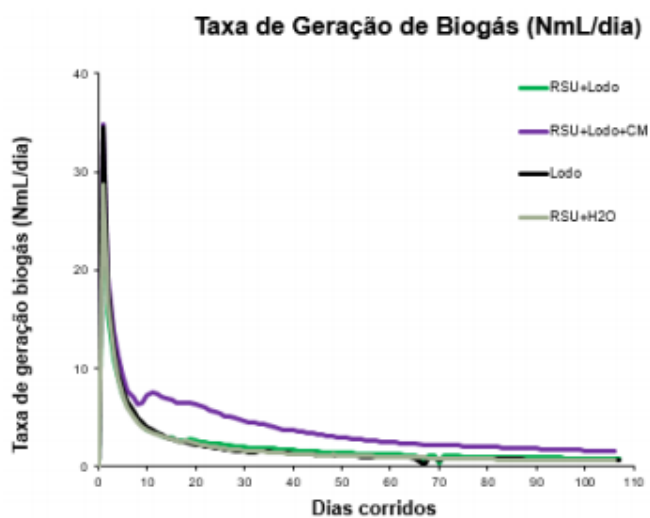


Figura 5 – Taxa de geração de biogás (NmL/dia). Onde: RSU (resíduo sólido urbano); H₂O (água); CM (consórcio microbiológico) = (consórcio bacteriano).

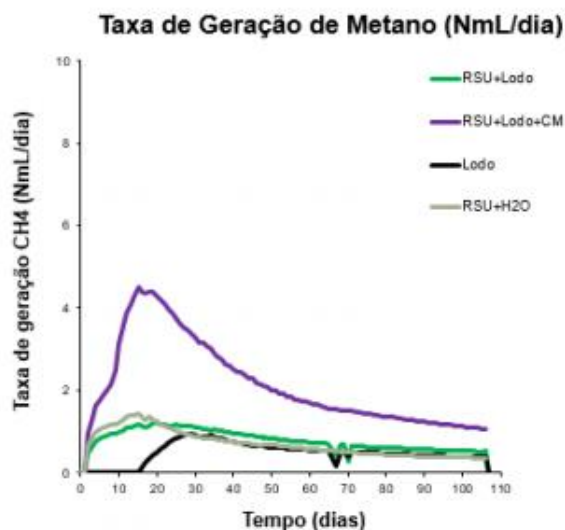


Figura 6 - Taxa de geração de metano (NmL/dia). Onde: RSU (Resíduo Sólido Urbano); H₂O (água); CM (Consórcio Microbiológico = Consórcio Bacteriano). Fonte: Adaptado de HOLANDA (2016).

O volume de biogás (CH₄ e CO₂) acumulado (NmL) é a soma de todas as taxas durante o período de 106 dias. Na Figura 7 observa-se que a degradação do RSU. A produção de biogás foi intensa no primeiro dia em todos os BMPs, pois todos contêm uma certa quantidade de biocenose. Os BMPs preenchidos pelo RSU + Lodo + CM, após o quarto dia de confinamento, continuaram produzindo biogás, enquanto os demais diminuíram. No vigésimo quinto dia de monitoramento da produção de biogás, este chegou à 76% (183,75 NmL) ou seja, em aproximadamente $\frac{1}{4}$ do tempo de detenção hidráulica ocorreu $\frac{3}{4}$ da produção do volume de biogás acumulado. Os BMPs contendo RSU + Lodo + CM apresentaram as melhores produções de biogás, atingindo o volume acumulado final do ensaio experimental de 240,32 NmL. Comparando o volume de biogás produzido no RSU + Lodo + CM (240,32 NmL) com e os demais ensaios, observou-se que foi 4,35 vezes maior RSU+ H₂O (55,18 NmL), 3,21 vezes maior que o Lodo (74,82 NmL), e 2,63 vezes maior que RSU + Lodo (91,4 NmL). Na Figura 8, o volume de metano é nitidamente superior nos ensaios dos BMPs contendo RSU + Lodo + CM do que nos BMPs contendo RSU + Lodo, RSU + H₂O e Lodo. A alta taxa de produção de metano nos vinte primeiros dias contribuiu no volume acumulado de CH₄.

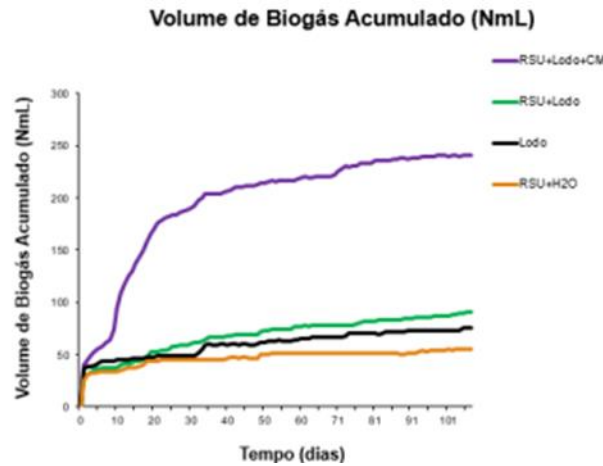


Figura 7. Volume de biogás acumulado (NmL). Onde: RSU (resíduo sólido urbano); H₂O (água); CM (Consórcio Microbiológico = Consórcio Bacteriano) Fonte: Adaptado de HOLANDA (2016).

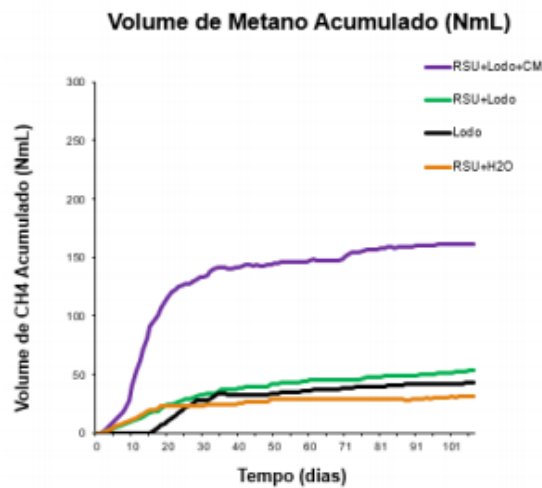


Figura 8. Volume de metano acumulado (NmL). Onde: RSU (resíduo sólido urbano); H₂O (água); CM (Consórcio Microbiológico = Consórcio Bacteriano). Fonte: Adaptado de HOLANDA (2016).

O potencial de geração de biogás é o volume de biogás gerado por grama de material sólido seco (NmL/gMS). Os BMPs contendo o consórcio bacteriano apresentou uma performance superior em relação aos outros tipos de ensaios. RSU + Lodo + CM (38,40 NmL/gs) enquanto RSU + Lodo (29,81 NmL/gs). O Lodo e RSU + água apresentam praticamente o mesmo potencial (12,12 NmL/gs e 11,04 NmL/gs respectivamente).

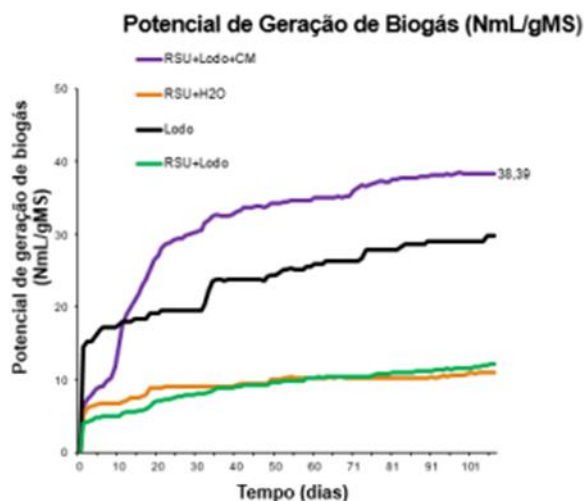


Figura 9 – Potencial de geração de biogás (NmL/gMS). Onde: RSU (resíduo sólido urbano); H₂O (água); CM (Consórcio Microbiológico = Consórcio Bacteriano) Fonte: Adaptado de HOLANDA (2016).

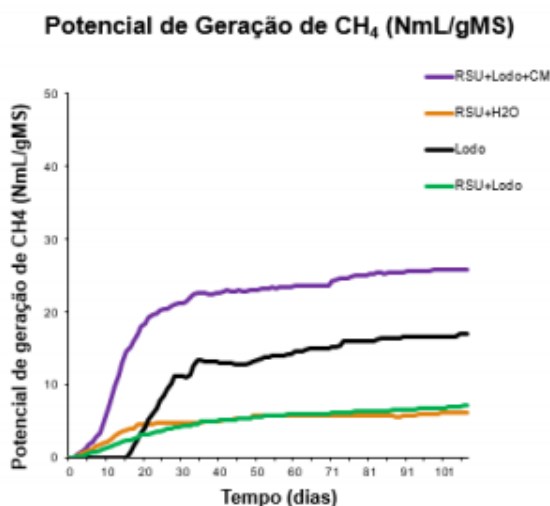


Figura 10 – Potencial de geração de metano (NmL/gMS). Onde: RSU (resíduo sólido urbano); H₂O (água); CM (Consórcio Microbiológico = Consórcio Bacteriano). Fonte: Adaptado de HOLANDA (2016).

Na análise quantitativa o percentual de CH₄ produzido entre 66% e 70% no conjunto RSU + Lodo + CM é um excelente resultado para um RSU envelhecido. O consórcio bacteriano combinado com o RSU e o lodo obteve uma produção de metano de 283,9% superior em relação a combinação entre RSU e lodo.

5 CONCLUSÕES

A hidrólise primeira fase de degradação dos resíduos sólidos é uma fase considerada fase de transição, pois sua biocenose facultativa é capaz de degradar os substratos na presença

do oxigênio nos seus primeiros momentos e de se adaptar em seguida à um meio cada vez mais anaeróbio. O consórcio bacteriano inoculado é capaz de excretar enzimas hidrolíticas (amilase, celulase, protease, xilanase e pectinase), degradando as macromoléculas dos RSUs em compostos monoméricos, servindo de substratos para as bactérias acidogênicas. O consórcio de bactérias hidrolíticas nativas do resíduo sólido urbano envelhecido à ser degradado atingiu uma aceleração da decomposição na fase de hidrólise, produzindo mais substratos para as acidogênicas e apresentando uma produção de gás metano na fase metanogênica bastante satisfatória. Em aproximadamente $\frac{1}{4}$ do tempo de detenção hidráulica com o consórcio bacteriano, ocorreram $\frac{3}{4}$ da produção do volume de biogás acumulado, cuja produção média foi de 66-70 % de biogás com o RSU envelhecido. As bactérias hidrolíticas nativas inoculadas estimularam indiretamente a produção de metano em tempo reduzido, podendo decompor mais RSU e assim produzir mais substratos para as atividades metabólicas das acidogênicas, continuando o ciclo de produção de biogás mais eficaz. A criação de um consórcio a partir da própria biocenose do resíduo foi o ponto chave desta pesquisa, promovendo uma solução simples, eficaz, eficiente e de baixo custo.

REFERÊNCIAS

- ABRELPE (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais). Atlas Brasileiro de Emissões de GEE e Potencial Energético na Destinação de Resíduos Sólido. 2013. Grappa Editora e Comunicação. 167 p.
- ABRELPE (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais). Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2015. Acesso: 19 ago. 2017.
- ACTU.com ENVIRONNEMENT. Dictionnaire Environnement. Disponível em: <www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/effet_de_serre.php4>. Acesso em: 04 oct. 2015.
- AL SEADI, T.; RUTZ, D.; PRASSL, H.; KÖTTNER, M.; FINSTERWALDER, T.; VOLK, S.; JANSSEN R. Biogas Handbook. University of Southern Denmark Esbjerg. 2008. 125 p. Disponível em: <<http://www.lemvigbiogas.com/BiogasHandbook.pdf>>. Acesso em: 18 jun. 2014.
- BRASIL. Ministério das Relações Exteriores. Política Externa. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). 2017. Disponível em: <<http://www.itamaraty.gov.br/pt-BR/politica-externa/desenvolvimento-sustentavel-e-meioambiente/134-objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel-ods>>. Acesso em: 20 ago. 2017.

D'ALMEIDA, M. L. O.; VILHENA A. Lixo Municipal. Manual de Gerenciamento Integrado. 2º ed. São Paulo: IPT/CEMPRE, 2002.

DE ARAUJO MORAIS, J. Influence des pré-traitements mécaniques et biologiques des Ordures Ménagères Résiduelles (OMR) sur leur comportement bio-physico-chimique en Installation de Stockage de Déchets (ISD). 2006. 219 F. Tese (Doutorado) – L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, École Doctorale de Chimie de Lyon, 2006.

G1. Veja repercussão da saída dos EUA do acordo de Paris. 2017. Disponível em :< <http://g1.globo.com/natureza/noticia/veja-repercussao-da-saida-dos-eua-do-acordo-deparis.ghtml>>. Acesso em: 20 ago. 2017.

GALEFFI, C. Biogás no mundo. 2013. Online. Disponível em: < <http://www.portalresiduossolidos.com/biogas-no-mundo-carlo-galeffi/>>. Acesso em 11 mar. 2015.

GOMES, M. P. Protocolo de Kyoto: origem. 2005. Disponível em: . Acesso em: 16 oct. 2015.

HANSEN T.L., SCHMIDT J.E., ANGELIDAKI I., MARCA E., JANSEN J.C., MOSBAEK H., CHRISTENSEN, T. H. Method for determination of methane potentials of solid organic waste. Waste Management, v. 24, p.393-400, 2004. Disponível em:< https://www.researchgate.net/publication/8622270_Method_for_determination_of_methane_potentials_of_solid_organic_waste>. Acesso em: 24 mai. 2016.

HOLANDA, S. H. B. 2016. Estudo da biodegradação e geração de biogás de resíduos minerados através da biotecnologia experimental. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil.

ISWA. Roteiro para o fechamento de lixões. Os lugares mais poluídos do mundo. 2017. Disponível em: <www.abrelpe.org.br/Panorama/iswa_web3.pdf>. Acesso em: 19 ago. 2017.

JOHANNESSEN, L. M. Guidance Note on Recuperation of Landfill Gas from Municipal Solid Waste Landfills. Urban Development Division – Urban Waste Management Thematic Group. 1999. Acesso em: 03 out. 2015.

Le Monde. Paris Climat 2015 – COP 21. Disponível em: . Acesso em: 29 abr. 2016.

LIMA, L. M. Q. Metanogênese em Aterro: Fundamentos Básicos-Parte I. Prefeitura Municipal de Campinas, Companhia Paulista de Força e Luz e Mangels Industrial S.A.1986.

LIMA, L. M. Q. Remediações de Lixões Municipais. Aplicações da Biotecnologia. Hemus. 2005.

MADIGAN; MARTINKO; PARKER. Microbiologia de Block. Pearson-Prentice Hall. 10ª edição. São Paulo. 2004.

MÉLO-SCHLUB, A. C. 2017. Desenvolvimento de consórcio bacteriano para a degradação de resíduos sólidos urbanos envelhecidos. Monografia de Conclusão de Curso Superior de Tecnologia em Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco.

OWEN, M. F., STUCKEY, D. C., HEALY, J. B., YOUNG, L. Y., MCCARTHY, P. L. Bioassay for monitoring biochemical methane potential and anaerobic toxicity. *Water Research*, v.13, p.485-492, 1979. Disponível em: . Acesso em: 21 set. 2015. PROJETO BIOGÁS. 2004. Biogás. Disponível em:. Acesso em: 02 jul 2014.

RESÍDUOS URBANOS. Campanha pelo fechamento dos lixões. 2017. Disponível em:. Acesso em: 20 ago. 2017.

SCHNÜRER, A.; JARVIS, A. *Microbiological Handbook for Biogas Plants*. Swedish Waste Management U2009:03. Swedish Gas Centre Report 207. 142 f. Disponível em: <http://www.eac-quality.net/fileadmin/eac_quality/user_documents/3_pdf/Microbiological_handbook_for_biogas_plants.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2016.

VITORATTO, E., 2004 Tratamento de effluents líquidos- orgânicos- sistemas anaeróbios.2004.Disponívelem: . Acesso em: 05 jan. 2016.