



## **Biodisponibilização energética através da ação de microorganismos metanogênicos em produtos e coprodutos presentes nos resíduos sólidos urbanos dispostos em aterros sanitários**

<sup>1</sup> **Márcia Aparecida Silva, doutoranda, programa PPGGIO, UFVJM**

<sup>2</sup> **José Izaquiel Santos da Silva, professor, doutor, programa PPGGIO, UFVJM**

### **RESUMO**

A produção de resíduos sólidos urbanos apresenta grandes disparidades, variando tanto no nível dos vários países do mundo, como, dentro de cada país, de região para região onde a assimetria é evidente e requer um processo de gerenciamento com protocolos e técnicas nem sempre cumpridos. A decomposição dos resíduos confinados em aterros ou dispersos pelo ambiente emite gases relacionados às alterações atmosféricas. No presente estudo foram usadas duas metodologias para estimar a geração de biogás e gás metano, a recomendada pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos e a do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, bem como foi realizada a amostragem e composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos conforme a metodologia simplificada indica pela FEAM de 2015 e a ABNT NBR 10.007:2004. Como metodologia foi proposto um estudo de caso no Aterro de Resíduos Sólidos Urbanos do Município de Ribeirão das Neves-MG e o levantamento gravimétrico dos RSU municipais. A descrição da ação microbiana frente a significativa e farta quantidade de resíduos depositados nos aterros é de fundamental importância para o monitoramento, a avaliação decompositora e suas características específicas. A determinação do mecanismo de ação das bactérias metanogênicas é um campo que ainda necessita de estudos e elaboração de experimentos específicos para cada aterro, sanitário ou controlado, principalmente no que refere-se a adequação de técnicas para inoculação deste tipo de microorganismos com o objetivo de potencializar a geração de biogás através da decomposição dos RSU com rigoroso monitoramento e controle.

**PALAVRAS-CHAVE:** Archaea; biogás; aproveitamento energético; metano.

## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1 Situação da política nacional de resíduos sólidos (PNRS) no Brasil**

Para atender a demanda sobre a gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU) a União elaborou o Plano Nacional (Planares) que esteve em consulta pública de 31/07/2020 a 16/11/2020. A proposta tem início com a análise do cenário atual e avaliação da aplicação da legislação vigente para o setor.

Entre 2010 e 2019, a geração de RSU no Brasil registrou considerável incremento, passando de 67 milhões para 79 milhões de tonelada por ano. Por sua vez, a geração per capita aumentou de 348 kg/ ano<sup>1</sup> para 379 kg/ano (ABRELP, 2020).

A quantidade de resíduos coletados cresceu em todas as regiões do país e, em uma década, passou de cerca de 59 milhões de toneladas em 2010 para 72,7 milhões de toneladas, em 2019 e, no mesmo período, a cobertura de coleta passou de 88% para 92%.

Em 2010, 3.152 municípios registravam alguma iniciativa de coleta seletiva, enquanto na década seguinte esse número aumentou para 4.070 municípios. Importante destacar, porém, que em muitos municípios as atividades de coleta seletiva ainda não abrangem a totalidade de sua área urbana.

O programa de gerenciamento de resíduos sólidos (PGRS) é um instrumento da PNRS (Lei 12.305/2010) de responsabilidade da União, Estados, Municípios e dos geradores especificados nesta. O diagnóstico da situação atual faz parte do seu conteúdo, sendo assim, faz-se necessário conhecer a composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos (RSU).

Enquanto o volume de recursos aplicados pelos municípios nos serviços de limpeza urbana, necessários para fazer frente a uma quantidade crescente de resíduos coletados, teve um acréscimo de pouco mais de 32% em uma década, passando de R\$ 7,68 por habitante por mês em 2010, para R\$ 10,15 por habitante por mês em 2019, o percentual acumulado da inflação no mesmo período foi de 76%<sup>12</sup>.

A Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020, atualizou a Política Nacional de Saneamento Básico, modernizando diversos trechos da legislação anterior que remonta ao ano de 2007. O novo marco legal do saneamento básico, como vem sendo chamado, trouxe novos princípios, diretrizes e orientações para o planejamento e execução dos serviços públicos de saneamento básico, dentre os quais incluem a limpeza urbana e o manejo de resíduos sólidos, constituídos das atividades e da disponibilização e manutenção de infraestruturas e instalações operacionais de coleta, varrição manual e mecanizada, asseio e conservação urbana, transporte, transbordo, tratamento e

destinação final ambientalmente adequada dos resíduos sólidos domiciliares e dos resíduos de limpeza urbana.

## **1.2 Descrição dos produtos e coprodutos presentes nos resíduos sólidos urbanos**

A sociedade humana apresenta uma complexidade de geração, consumo e descarte de resíduos, sejam eles, sólidos, líquidos gasosos e de natureza diversa. A princípio, os resíduos das ações humanas apresentavam características fundamentalmente orgânicas, entretanto, com a transformação e produção de bens industrializados, houve a diversificação dos produtos, coprodutos e resíduos dispersos nas mais variadas quantidades e qualidade.

Atualmente, os resíduos sólidos urbanos necessitam de disposição ambientalmente adequada, o que pode ocorrer nos aterros sanitários. Entretanto, uma quantidade significativa de RSU ainda é lançada de maneira incorreta, o que requer uma rigorosa, e muitas vezes ausente, intervenção do poder público de fiscalização ambiental.

A caracterização do tipo de RSU é bastante diversificada entre as cidades brasileiras, conforme a estratificação social e disponibilização de bens e serviços. Para que ocorra uma aproximação da definição dos tipos percentuais de RSU, cada local de disposição destes deve adotar monitoramento constante avaliando os tipos de RSU através de metodologias apropriadas, tais como, avaliar produtos comercializados e levantamentos gravimétricos dos RSU nas fontes de geração, bem como nas entradas dos aterros de disposição final.

## **2. OBJETIVO GERAL**

(A) Descrever a transformação anaeróbia dos materiais, produtos e coprodutos dispostos aterros sanitários, visando a potencialização da geração do gás metano e dióxido de carbono.

### **2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Para que o principal objetivo deste estudo fosse alcançado, tornou-se necessário o cumprimento dos seguintes objetivos específicos:

- (A) Avaliar a situação atual da disposição dos RSU e coleta seletiva no Município de Ribeirão das Neves.
- (B) Avaliar a composição gravimétrica dos RSU do ACRN
- (C) Descrever a ação de microorganismos no processo de decomposição da matéria orgânica disposta no ACRN e a geração de biogás.
- (D) Descrever a ação metanogênica das Archaeas.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1 Gravimetria de RSU**

O estudo gravimétrico de RSU avalia as características físicas dos resíduos que traduz o percentual de cada componente em relação ao peso total da amostra de lixo analisada. A sua composição mais simplista indica papel/papelão, plástico, vidros, metais, matéria orgânica e outros.

A determinação da composição gravimétrica pode ser feita da seguinte forma, segundo Monteiro (2001):

- escolher, de acordo com o objetivo que se pretende alcançar, a lista dos componentes que se quer determinar;
- espalhar o material dos latões sobre uma lona, sobre uma área plana;
- separar o lixo por cada um dos componentes desejados;
- classificar como “outros” qualquer material encontrado que não se enquadre na listagem de componentes pré-selecionada;
- pesar cada componente separadamente;
- dividir o peso de cada componente pelo peso total da amostra e calcular a composição gravimétrica em termos percentuais.

Uma dificuldade evidenciada pela literatura correlata sobre o levantamento gravimétrico é a ausência de padronização metodológica na análise dos RSU, comprometendo a compilação dos dados pelos estados, prejudicando a comparação e a consolidação de resultados. Por isso, a complexidade de estabelecer a composição em nível nacional e regional.

Em Minas Gerais, a título de exemplo, a Fundação Estadual de Meio Ambiente (FEAM) enviou, em 2015, um ofício para todos os municípios mineiros solicitando informações da geração per capita, peso específico e composição gravimétrica. A fim de

uniformizar as respostas, foi indicada uma metodologia simplificada a ser seguida. Menos da metade dos municípios retornaram com os dados, estes culminaram na publicação “Caracterização gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos do Estado de Minas Gerais Volume I – Geração Per capita”.

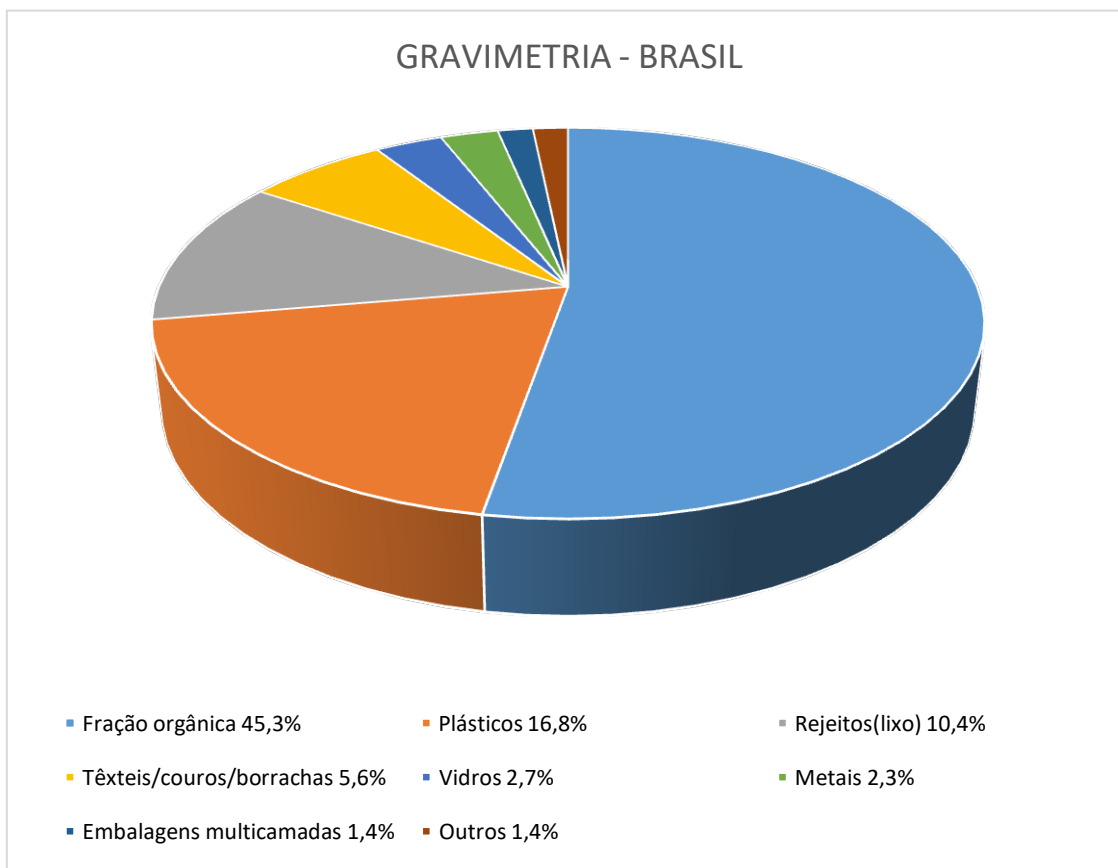
No Rio de Janeiro, os parâmetros utilizados para estimar a gravimetria dos resíduos foram o consumo aparente dos materiais potencialmente recicláveis e a participação de cada um destes na produção de embalagens, conforme Plano Estadual de Resíduos Sólidos.

Em síntese, a gravimetria de resíduos sólidos é importante na administração dos recursos necessários para o gerenciamento da pasta por órgãos públicos e empresas. Através da sua análise é possível dimensionar os serviços coleta de seletiva de forma estratégica, estabelecer metas visando a sua ampliação, estabelecer ou adequar os programas de educação ambiental, bem como determinar decisões de implantação de captação de biogás, dentre outras atividades.

Segundo a ABRELP, a gravimetria nacional foi estimada com base na média ponderada a partir da geração total de RSU por faixa de renda dos municípios e suas respectivas gravimetrias, levando-se em consideração a população e geração per capita.

A partir da compilação dos dados disponíveis nos relatórios avaliados, foi possível desenvolver uma comparação estatística e sua harmonização, contemplando os diferentes componentes dos RSU e seus percentuais apontados na Figura 01.

Figura 01- Dados gravimétricos levantamento Ano 2019



Fonte: Adaptado, ABRELP, 2020

Nota-se que a fração orgânica ainda permanece como a principal componente dos RSU, com 45,3 e com 1,4%, são diversos materiais, teoricamente objetos de logística reversa. Cabe ressaltar, que a fração de interesse para a geração de biogás é a de maior percentual, a orgânica. Segundo dados da ABRELP, no ano de 2014, a fração orgânica de compilação nacional, para o Brasil, foi de 51,5%, diversos fatores podem ter provocado esta redução, tais como, déficit de compilação nos dados, redução no descarte e/ou consumo de resíduos orgânicos e inclusive a possibilidade de disposição adequada em compostagem. Entretanto, a disposição adequada dos RSU possibilita a destinação para fins ambientalmente sustentáveis, tais como a captação de biogás e geração de energia.

### 3.2 Biodisponibilização energética nos RSU

A diversificação da matriz energética brasileira por fontes renováveis tem sido um assunto bastante discutido nos últimos anos, devido ao aumento da demanda de energia elétrica e ao esgotamento dos combustíveis fósseis. Com isso, investir em fontes de energia como o biogás proveniente de aterros sanitários pode ser uma maneira

favorável de tratar o problema, pois, além de trazer um benefício econômico, o gás metano produzido pela decomposição dos RSU é 25 vezes mais nocivo para a atmosfera do que o dióxido de carbono.

Em 2019, o setor de resíduos respondeu por 4%<sup>1</sup> do total de emissões de gases de efeito estufa no Brasil, o que corresponde a 96 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> eq emitidas.

Ao considerar o ano de 2010 como um referencial, registramos um aumento de 23% nas emissões, com dois terços destas sendo provenientes de atividades de disposição final, incluindo aterros sanitários, aterros controlados e lixões (ABRELP, 2020).

No Brasil, os sistemas de captura e aproveitamento do biogás em aterros sanitários ainda não são uma realidade em todas as unidades. De acordo com a plataforma da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Clima, até 2019, existiam 49 projetos de recuperação de biogás registrados no país e outros em vias de implantação. A ausência de um sistema de coleta de gás resulta na emissão de 1.170 kg CO<sub>2</sub> eq/ ton, ou 47 kg CH<sub>4</sub> /ton (28 vezes mais potente do que o dióxido de carbono), enquanto sua presença resulta na emissão de 819 kg CO<sub>2</sub> eq/ton, ou 33 kg CH<sub>4</sub> /ton<sup>3</sup>.

De acordo com a gravimetria, a fração orgânica responde por cerca de 45% de todos os resíduos gerados no país, isto é, pouco mais de 36 milhões de toneladas de restos de alimentos e resíduos de poda, as quais são, majoritariamente, enviadas para disposição final e, logo, fonte de emissões de GEE. Alternativamente, processos como digestão anaeróbica, tratamento mecânico biológico com recuperação da fração orgânica, e a própria compostagem, evitam emissões em uma proporção de 2,3 kg CH<sub>4</sub> /ton a partir da digestão anaeróbica e 3 kg CH<sub>4</sub> /ton por meio da compostagem.

A biodisponibilização energética dos RSU ocorre pela ação decompositora de microorganismos, em especial os seres metanogênicos, especialmente os do grupo de Archea, que utilizam a fração orgânica presente nos resíduos dispostos em aterros sanitários, e até mesmo nos RSU dispostos de maneira irregular, tais como lixões e aterros, ditos controlados.

### **3.3 Cálculo da potência disponível**

O cálculo para estimar a potência disponível através do biogás gerado pela decomposição da matéria orgânica do aterro sanitário é dada a partir da equação 01(CETESB, 2006),



$$(01) \quad Pot = \frac{Q \cdot Ec \cdot PCI \cdot \eta}{31.536.000}$$

Onde:

- Pot: potência disponível (kW);
- Q: vazão de biogás coletado (m<sup>3</sup> /ano);
- Ec: eficiência de coleta do gás;
- η: rendimento do motor de combustão interna operando em plena carga, 33%;
- PCI: poder calorífico inferior do biogás (kJ/m<sup>3</sup> );
- 31.536.000: tempo de operação em um ano (s)

A conversão de metano em energia para cada ano é calculada da seguinte maneira:

$$(02) \quad E = P_{disp} \cdot t$$

Onde:

- E: Potência elétrica útil (kW)
- P<sub>disp</sub>: Potência disponível (kW)
- t: número de horas de operação anual. Valor adotado 8.000 horas, considerando que 760 horas sejam para eventuais paradas de manutenção.

O Software LandGEMO®, (Landfill Gas Emissios Model-Modelo de Emissão de Gases de Aterro Sanitário), software da United States Environmental Protection Agency (USEPA, 2005), é uma ferramenta de estimativa com interface do Microsoft Excel que pode ser usado para estimar as taxas de emissões de gás total do aterro, metano, dióxido de carbono, compostos orgânicos não metano e os poluentes atmosféricos individuais de aterros sanitários de resíduos sólidos. O LandGEM®, utiliza a equação de primeira ordem para estimar a taxa de emissões pela decomposição anual em relação a um período de tempo especificado pelo usuário.

A produção de gás aumenta conforme mais resíduos são depositados no aterro, com o passar dos anos, até que essa produção de gás chega ao seu máximo valor de 10,43.106 m<sup>3</sup> /ano, que corresponde ao último ano de funcionamento do aterro. A partir deste ponto a curva decai, uma vez que o aterro já não recebe RSU e pela recalitrância



microbiana, ou seja, a incapacidade dos microrganismos na degradação e reciclagem de nutrientes.

### **3.4 Descrição da ação de microorganismos metanogênicos**

Os aterros sanitários são conceitualizados como reatores bioquímicos pela ação de microorganismos, que tem como principal fonte de alimentação os resíduos sólidos e a água, e como principais subprodutos, os líquidos lixiviados e o biogás (TCHOBANOGLOUS e KREITH, 2002).

Basicamente, a biometanização consiste na degradação biológica da matéria orgânica por uma variedade de microorganismos anaeróbios (facultativos e obrigatórios) na ausência de oxigênio. Os produtos finais do processo são o material digerido (digestato) e o biogás (McCARTY, 1982).

Destaca-se a transformação anaeróbia do material orgânico bruto em bioestabilizado nos aterros sanitários, com a geração do gás metano e dióxido de carbono, é assumida conceitualmente como um processo de cinco fases (BIDONE e POVINELLI, 1999), denominadas de Ajuste Inicial (Fase I), Transição (Fase II), Ácida (Fase III), Metanogênica (Fase IV) e Maturação (Fase V), segundo o modelo teórico proposto por Tchobanoglous et al. (1993).

A duração das fases individuais na geração de biogás em aterros sanitários variará conforme a distribuição dos componentes orgânicos no aterro, a dimensão da célula de resíduos, a disponibilidade de nutrientes, o teor de umidade dos RSU, a passagem de umidade através dos resíduos e o grau de compactação inicial.

Diversas variáveis afetam o desenvolvimento dos microrganismos responsáveis pela decomposição anaeróbia dos RSU e, conseqüentemente, a geração de biogás em aterros sanitários. Dentre essas variáveis incluem-se as características dos resíduos, o potencial hidrogeniônico (pH), a temperatura, a umidade dos resíduos, a disponibilidade de nutrientes, o estado físico dos resíduos (tamanho das partículas), a construção e tamanho do biodigestor, a presença de inibidores, entre outros fatores (El-FADEL et al., 1997; CASTILHOS JUNIOR et al., 2003; MATHERI et al., 2017).

A disponibilidade de frações mais facilmente degradáveis (carboidratos, proteínas e lipídios) significa uma maior quantidade de substrato para a atuação de microrganismos (MACIEL, 2003). Assim, quanto mais facilmente é decomposta a fração orgânica dos RSU, a exemplo de resíduos de alimento, mais acelerada será a taxa de geração de biogás (BRITO FILHO, 2005). No entanto, alguns resíduos

biodegradáveis, tais como grandes pedaços de madeira, que não são inertes, mas se decompõem lentamente, na prática, não contribuem de forma significativa com a geração de gases em aterros sanitários (FERNANDES, 2009).

Segundo Melo (2011) hoje há uma preocupação na área de ciências dos materiais na confecção de produtos que sejam mais facilmente biodegradáveis após o seu uso. Essa medida proporcionaria não só uma melhor decomposição desses materiais, mas também aumentaria a vida útil dos aterros.

Nos processos biodegradativos, a temperatura é um parâmetro que implica balanços energéticos e, em geral, dentro de determinados limites, menor temperatura significa menor atividade e menor taxa de conversão do material orgânico presente nos RSU por meio da ação bioquímica de microrganismos (ALCÂNTARA, 2007). Nesse contexto, Bouallagui et al. (2004) verificaram, por meio de experimentos de laboratório, que os processos de digestão anaeróbia termofílicos geram até 41% mais biogás que os processos mesofílicos e 144% a mais que os psicofílicos.

Os microrganismos anaeróbios envolvidos no processo de conversão da matéria orgânica em metano são pertencentes a dois domínios diferentes: *Bacteria* e *Archaea*. Inicialmente, as arqueas foram consideradas membros anômalos do domínio *Bacteria* por apresentarem o mesmo padrão de célula procariótica (no geral, ausência de núcleo verdadeiro e de organelas funcionais), possuírem um único cromossomo circular e transcreverem vários genes a partir de um mesmo mRNA policistrônico (MADIGAN et al., 2010).

Contudo, o sequenciamento comparativo do ácido ribonucleico ribossomal (RNAr) tornou as arqueas um grupo reconhecidamente distinto das bactérias típicas e revelou maior relação genética entre *Archaea* e *Eukarya* do que entre *Bacteria* e *Archaea* (WOESE; FOX, 1977).

Assim, as *Archaea* passaram a representar um novo domínio e, juntamente com o domínio *Bacteria*, integram o grupo dos procariotos. Apesar de bactérias e arqueas serem similares quanto ao tamanho e à forma, existem diferenças entre esses dois grupos de organismos quanto à organização do genoma, expressão gênica, composição celular e filogenia.

A atuação conjunta e equilibrada de bactérias e arqueas em um meio anaeróbio conduzem quatro etapas principais do processo de biometanização reconhecidas até o momento: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (WEISS et al., 2008).



**Quadro 01** - Algumas características que diferenciam os domínios *Bacteria* e *Archaea*

<b>CARACTERÍSTICA</b>	<b>DOMÍNIO BACTERIA</b>	<b>DOMÍNIO ARCHAEA</b>
<b>Parede celular</b>	Contém peptidoglicano	Não contém peptidoglicano; possui um polissacarídeo similar, denominado pseudopeptidoglicano
<b>Membrana de lipídeos</b>	Composta por éster de ácidos graxo, formando cadeias retas	Composta por éter de ácidos graxos, formando cadeia longas e ramificadas
<b>RNA polimerase</b>	Existe um único tipo com estrutura quaternária simples (estrutura tridimensional)	Possuem vários tipos estruturalmente complexos. Como consequência, alguns aspectos da síntese de proteínas são diferentes da realizada por bactérias

Fonte: Vazoller; Manfio e Canhos (1999).

No caso da biometanização, o rendimento do biogás e a utilidade do digestato serão resultados da qualidade do material de entrada. Se o substrato for proveniente da separação na fonte e da coleta seletiva é mais garantido que se obtenha elevado rendimento de biogás, principalmente pela remoção de resíduos potencialmente inertes ou que prejudiquem a ação dos microorganismos.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 ESTUDO DE CASO: ATERRO CONTROLADO DE RIBEIRÃO DAS NEVES

O aterro controlado municipal começou a ser operado no ano de 2005, entretanto, com a mudança da legislação dos resíduos sólidos urbanos, o órgão ambiental estadual iniciou uma série de notificações junto à prefeitura para que esta encerrasse as atividades no ACRN e passasse a operar com um aterro sanitário. O ACRN situa-se na Rodovia Estadual LMG 806, região de Justinópolis, em divisa com o Bairro Viena, duas fazendas e o um córrego. A disposição de RSU no ACRN foi suspensa no ano de 2020 e atualmente os RSU municipais são encaminhados para o Aterro Sanitário Macaúbas, localizado no Município de Sabará-MG, através de convênio e parceria público privada.

O presente estudo usou como referência os estudos gravimétricos realizados quando da operação do ACRN e referencial teórico relacionados aos objetivos do presente estudo.



Segundo a ABNT NBR 10.007:2004, a amostragem de resíduos sólidos, ou determinação da composição gravimétrica consiste em determinar os constituintes e de suas respectivas percentagens em peso e volume, em uma amostra de resíduos sólidos, podendo ser físico, químico e biológico. Foi realizada a determinação gravimétrica neste estudo, conforme preconizado pelo órgão ambiental estadual (FEAM, 2016), que tem por objetivo orientar e padronizar esta atividade nos municípios mineiros.

Tabela 1 - Resultados gravimétricos de RSU no ACRN segundo metodologia

ABNT- NBR 10.007/2004

<b>RESÍDUO</b>	<b>Kg</b>	<b>%</b>	<b>RESÍDUOS</b>	<b>Kg</b>	<b>%</b>
<b>MATÉRIA ORGÂNICA</b>	83,5	41,75	<b>OUTROS</b>	6,54	3,27
<b>PAPEL</b>	31,05	15,53	<b>MADEIRA</b>	1,42	0,71
<b>PLÁSTICO</b>	24,13	12,07	<b>INERTES</b>	29,16	14,58
<b>VIDROS DIVERSOS</b>	10,99	5,50	<b>NÃO IDENTIFICÁVEIS</b>	9,32	4,66
<b>METAIS</b>	<b>11,85</b>	<b>5,93</b>	<b>Entulho 12,02 6,01</b>	12,02	

Fonte: Autora, 2019

O valor de matéria orgânica (41,75%) prevalece sobre os demais, entretanto, com os dados obtidos na determinação gravimétrica, fica evidenciado que o total de (38,98%) é constituído de material com possibilidade para destinação de reciclagem, logística reversa, co-processamento e compostagem.

Com os resultados obtidos, constata-se as diferenças entre a aplicação das técnicas em: logística reversa (6,89%); co-processamento (9,5%); compostagem (12,59%) e reciclagem (0,2%). Cabe ressaltar o peso total da amostragem geral do estudo da composição gravimétrica, com a metodologia FEAM (2015), o peso total das amostras foi de 3.127,80 kg e com a metodologia NBR 10.007 (2004), o peso total foi de 8.830 kg, em todas as amostragens houve a realização do quarteamento até o quantitativo de 200 kg.

## 5. CONCLUSÃO

Destaca-se neste ponto, a necessidade de implementação de projetos de coleta seletiva para aumentar a vida útil dos aterros de RSU o que promoverá uma deposição percentual em maior quantidade da fração correspondente de maior potencial energético.

A análise da amostragem de resíduos sólidos, através da determinação da composição gravimétrica foi de fundamental importância para avaliar a estimativa do potencial de aproveitamento energético e dados sobre a disposição final de RSU no ACRN bem como relacionar o tipo de RSU com a análise da diversidade dos microorganismos envolvidos no processo de biometanização para se obter informações acerca das propriedades metabólicas espécie-específica responsáveis pela decomposição dos resíduos (KLAMMER; KNAPP; INSAM, 2008) e propor tecnologias para intensificar a ação metanogênica no maciço dos aterros sanitários.

A aplicação de técnicas moleculares no estudo dos microorganismos envolvidos no processo de biometanização fornece dados que, se analisados em conjunto com dados de técnicas complementares (que utilizam imagem, isótopo marcado e levantamento de características físico-químicas do meio) permitirão o avanço do entendimento sobre como a estrutura e dinâmica microbianas influenciam no desempenho global e eficiência da biometanização e como a alimentação, configuração do biometanizador e condições operacionais determinam tais características da comunidade de microorganismos presentes nos aterros de resíduos sólidos urbanos e consequentemente, a geração e aproveitamento energético do biogás.

## REFERÊNCIAS

- ALCÂNTARA, P. B. **Avaliação da influência da composição de resíduos sólidos urbanos no comportamento de aterros simulados**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, 2007.
- ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020**. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/Panorama-2020-V5-unicas.pdf> Acesso em 25 de Março de 2021.
- BIDONE, F.R.A.; POVINELLI, J. **Conceitos básicos de resíduos sólidos**. EESC/USP. São Carlos –SP, 1999, 120 p. ISBN 85205-27-X.
- BOUALLAGUI, H.; HAOUARI, O.; TOUHAMI, Y.; CHEIKH, R. B.; MAROUANI, L.; HAMDI, M. Effect of temperature on the performance of an anaerobic tubular reactor treating fruit and vegetable waste. **Process Biochemistry**, v. 39, 2004, p. 2143-2148. DOI: 10.1016/j.procbio.2003.11.022.



- BRITO FILHO, L. F. **Estudo de gases em aterros de resíduos sólidos urbanos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 2005.
- EL-FADEL, M.; FINDIKAKIS A. N.; LECKIE, J. O. Environmental impacts of solid waste landfilling. **Journal of Environmental Management**, v. 50, 1997, p. 1-25.
- IWAI, Cristiano Kenji. Tratamento de chorume através de percolação em solos empregados como material de cobertura de aterros para resíduos sólidos urbanos. 2005. 205 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, 2005. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/90805>>.
- KLAMMER, S.; KNAPP, B.; INSAM, H. Bacterial community patterns and thermal analyses of composts of various origins. **Waste Management & Research**, v. 26, p. 173–187, 2008.
- MACIEL, F. J. **Estudo da geração, percolação e emissão de gases no Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca - PE**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Pernambuco, Recife-PE, 2003.
- MADIGAN, M. T.; MARTINKO, J. M.; DUNLAP, P. V.; CLARK, D. P. **Microbiologia de Brock**. 12ª edição. Porto Alegre: Artmed, 2010. 1128p.
- MELO, M. C. **Estudo da matéria orgânica nos recalques de resíduos sólidos urbanos aterrados**. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2011.
- TCHOBANOGLIOUS, G.; THIESEN, H.; VIGIL, S. A. **Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues**. 2 ed. il., New York: McGraw – Hill International Editions, 1993, 987p. ISBN-13: 978-0070632370.
- TCHOBANOGLIOUS, G.; KREITH, F. **Handbook of solid waste management**. 2. ed. Estados Unidos, 2002. DOI: 10.1036/0071356231.
- VANWONTERGHEM, I.; JENSEN, P. D.; HO, D. P.; BATSTONE, D. J.; TYSON, G. W. Linking microbial community structure, interactions and function in anaerobic digesters using new molecular techniques. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 27, p. 55–64, 2014.
- VAZOLLER, R.F.; MANFIO, G.P.; CANHOS, V.P. **Domínio Archaea: Reinos Crenarcheota, Euryarcheota e Korarcheota**. In: CANHOS, V.P.; VAZZOLER, R.F. (eds). Série biodiversidade do Estado de São Paulo: Microrganismos e vírus. São Carlos: FEA/UNICAMP, 1999. v.1.
- WEISS, A.; JÉRÔME, V.; FREITAG, R.; MAYER, H. K. Diversity of the resident microbiota in a thermophilic municipal biogas plant. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 81, p. 163-173, 2008.
- WOESE, C. R.; FOX, G. E. Phylogenetic structure of the prokaryotic domain: The primary kingdoms. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)**, v.74, n. 11, p. 5088-5090, 1977.