

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
CAMPUS LONDRINA  
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

JESSICA LARA NUNES DE SOUZA

**INFLUÊNCIA DA TAXA DE RECIRCULAÇÃO DE LIXIVIADO NA  
DEGRADAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS E PRODUÇÃO  
DE BIOGÁS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA  
2014

JESSICA LARA NUNES DE SOUZA

**INFLUÊNCIA DA TAXA DE RECIRCULAÇÃO DE LIXIVIADO NA  
DEGRADAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS E PRODUÇÃO  
DE BIOGÁS**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, câmpus Londrina, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Ambiental.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Tatiane Cristina Dal Bosco.

Coorientador: Prof. Msc. Bruno de Oliveira Freitas.

LONDRINA  
2014



**Ministério da Educação**  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
Campus Londrina  
Coordenação de Engenharia Ambiental



## TERMO DE APROVAÇÃO

### Título da Monografia

Influência da taxa de recirculação de lixiviado na degradação de resíduos sólidos urbanos e produção de biogás

por

Jessica Lara Nunes de Souza

Monografia apresentada no dia 15 de dezembro de 2014 ao Curso Superior de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho \_\_\_\_\_ (aprovado, aprovado com restrições ou reprovado).

---

Prof. Dr. Ajadir Fazolo  
(UTFPR)

---

Prof. Dr. Aulus Roberto Romao Bineli  
(UTFPR)

---

Profa. Dra. Tatiane Cristina Dal Bosco  
(UTFPR)  
Orientador

---

Profa. Dra. Ligia Flávia Antunes Batista  
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Ambiental

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais por todo o esforço e concessões que fizeram para que eu tivesse a minha formação, nunca me esquecerei disso. Obrigada por todo amor e por todos os valores que me passaram, devo a vocês tudo que sou. Em especial agradeço a minha mãe, por todos os conselhos valiosos e pelo exemplo de grande mulher e mãe, quem dera ser um pouquinho do que você é mãe. Amo vocês de todo o meu coração.

Agradeço à minha irmã Larissa, minha melhor amiga, com quem sempre pude contar; ao meu irmão Leonardo, por todo carinho; à minha vó Ana, pelo amor, pelo auxílio e pelas orações que fez por mim; e a toda a minha família. Obrigada por todo o apoio e palavras de incentivo. Vocês são meu bem mais valioso, meu refúgio onde sei que sempre encontrarei muito amor.

Agradeço à minha querida orientadora Tatiane Dal Bosco, que sempre foi bem mais que uma orientadora. Tati obrigada pela dedicação, incentivo e compreensão, você é a síntese do que é ser um professor.

Agradeço ao meu orientador Bruno de Oliveira Freitas, que com seu conhecimento e criatividade tornou possível a construção dos reatores, mesmo sem muitos recursos. Professor, obrigado pela dedicação a este trabalho.

Agradeço aos amados amigos, pelo prazer que é ter a amizade de vocês e poder compartilhar alegrias, tristezas e ideias, quero ter vocês sempre por perto. Obrigado especial para Hellen, André, Ana, Marcella, Carol, Lili, Larissa, Moni e Kátia, amo vocês!

Agradeço aos meus irmãos científicos: Jaque, Vítor, Andressa, Pedro e Ivan. Pela companhia que tornou o laboratório um lugar mais feliz e por todo auxílio que me deram.

## RESUMO

SOUZA, J. L. N. de. **Influência da taxa de recirculação de lixiviado na degradação de resíduos sólidos urbanos e produção de biogás.** 2014. 72 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Ambiental). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina. 2014.

O crescente consumismo observado na sociedade atual está intimamente relacionado ao aumento da geração de resíduos sólidos urbanos, causando uma preocupação no que tange ao gerenciamento e à disposição adequada. O aterro sanitário é um método de disposição final de resíduos com técnicas de construção e operação específicas. A recirculação do lixiviado no aterro sanitário contribui para aceleração do processo de degradação da matéria orgânica e o tratamento do lixiviado. Este trabalho teve como objetivo avaliar a influência das taxas de recirculação do lixiviado na aceleração da digestão anaeróbia dos resíduos sólidos urbanos, utilizando-se reatores anaeróbios simulando células de aterro sanitário. Os reatores foram confeccionados de recipientes de polietileno de alta densidade (PEAD), com 49 cm de altura, 35 cm de diâmetro e volume de 47 litros, possuindo sistemas para simulação de chuva, coleta e recirculação de lixiviado e quantificação da produção biogás. Os reatores foram preenchidos com resíduo sólido urbano padrão, com a fração orgânica obtida no restaurante universitário da UTFPR. Os tratamentos empregados foram: recirculação de 100% do lixiviado gerado (R1), recirculação de 50% do lixiviado gerado (R2) e não recirculação (R3). A simulação de chuva foi feita a partir de dados históricos de precipitação para Londrina, sendo realizada em dias intercalados à recirculação de lixiviado. O monitoramento na massa de resíduos se deu na fração orgânica, sendo realizado antes da inserção nos reatores e ao término do experimento. Os parâmetros analisados foram pH, condutividade elétrica, sólidos totais, sólidos voláteis, carbono orgânico total, nitrogênio total e aspecto visual dos resíduos. O monitoramento do lixiviado foi semanal. Os parâmetros analisados foram pH, condutividade elétrica, DQO, ácidos orgânicos voláteis, nitrogênio amoniacal, sólidos totais e sólidos voláteis. A quantificação da produção de biogás foi feita em dias intercalados, pelo método de deslocamento de volume. O experimento teve duração de 55 dias. Foi observada a ocorrência de degradação dos resíduos em todos os reatores, porém mais intensa em R1 e R2. A recirculação em R1 e R2 promoveu a manutenção de altas concentrações dos constituintes do lixiviado, enquanto que a ausência de recirculação (R3) promoveu a lavagem e diluição. A recirculação de 100% do lixiviado produzido em R1 pode ter influenciado na inibição da produção de biogás. A produção acumulada de biogás foi estatisticamente superior em R2, apontando este tratamento como vantajoso para a aceleração da digestão anaeróbia dos resíduos e produção de biogás.

**Palavras chave:** reatores anaeróbios, aterro sanitário, chorume.

## ABSTRACT

SOUZA, J. L. N. de. **Influence of leachate recirculation on municipal solid waste biodegradation and biogas production.** 2014. 72 p. Completion of coursework (Bachelor of Environmental Engineering). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina. 2014.

The growing consumerism observed in the current society is closely related to the increase of solid waste production in the urban centers, causing to a concern about management and proper disposal. Landfills are a method used for final disposal of solid waste by specialized construction and operation techniques. The leachate recirculation in landfills accelerates the degradation process of organic matter and leachate treatment. This research aimed to evaluate the influence of leachate recirculation rates on the acceleration of municipal solid waste anaerobic digestion, using anaerobic reactors simulated landfill cells. The reactors were made from high density polyethylene containers (HDPE), with 49 cm height, 35 cm diameter and a volume of 47 L, including systems for rainfall simulation, leachate collection and recirculation and measuring the biogas production. The reactors were fulfilled with standard municipal solid waste with the organic fraction obtained at the University's cafeteria. The treatments applied as follows: 100% generated leachate recirculation (R1), 50% generated leachate recirculation (R2) and no recirculation (R3). The rainfall simulation was made based upon historical Londrina's rainfall data, being held in days interspersed with the leachate recirculation. The organic fraction was monitored, occurring before waste insertion in the reactors and at the end of the experiment. The parameters analyzed include pH, electric conductivity, total solids, volatile solids, total organic carbon, total nitrogen visual aspects of waste. The control of leachate was done on a weekly basis. The parameters analyzed here were pH, electric conductivity, COD, volatile organic acids, ammonia nitrogen, total solids and volatile solids. The quantification of biogas production was done using the volume displacement method, being measured every other day. The experiment period lasted 55 days. Recirculation promoted maintenance of high concentrations of constituents in R1 and R2 leachate. The occurrence of waste degradation in all of the reactors was observed, but more intense in R1 and R2. The recirculation created an increase in the leachate constituent concentrations in R1 and R2, while the absence of recirculation caused rinsing and dilution of leachate in R3. Recirculating 100% leachate produced in R1 may have influenced the inhibition of biogas production. The cumulative biogas production was statistically significantly higher in R2, pointing this treatment as beneficial to the acceleration of the anaerobic digestion of waste and biogas production.

**Keywords:** anaerobic reactors, landfill, leachate.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia .....	23
Figura 2 - Reator confeccionado para o experimento .....	35
Figura 3 - Em (a) sistema para introdução e distribuição de lixiviado e água e condução do biogás, em (b) vista da parte externa do sistema e em (c) vista da parte interna do sistema. ....	35
Figura 4 - Tela colocada da entrada interna da torneira para impedir sua obstrução. ....	36
Figura 5 - Sistema para medição da produção de biogás. ....	36
Figura 6 - Reatores instalados na casa de vegetação da universidade .....	37
Figura 7 - Seringa utilizada para inserção de água e lixiviado .....	38
Figura 8 - Fração orgânica após homogeneização em tambor plástico .....	40
Figura 9 - Materiais utilizados na composição do resíduo sólido urbano padrão: papel/papelão (a), vidro (b), metal (c), plástico (d), isopor (e), maravalha (f) e tecido (g).....	41
Figura 10 - Processo de preenchimento dos reatores em (a) e compactação dos resíduos em (b) .....	42
Figura 11 - Vista superior dos reatores após 55 dias .....	45
Figura 12 - Aspecto dos resíduos do reator 1 após o experimento .....	46
Figura 13 - Aspecto dos resíduos do reator 2 após o experimento .....	46
Figura 14 - Aspecto dos resíduos do reator 3 após o experimento .....	47
Figura 15 - Cascas e pedaços de cenoura e folhas de couve pertencentes aos resíduos do reator 3 .....	48
Figura 16 - Acúmulo de lixiviado na massa de resíduos do reator 1 .....	48

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Volume de lixiviado produzido nos reatores. ....	51
Gráfico 2 - Produção acumulada de lixiviado ao longo do experimento nos reatores .....	52
Gráfico 3 - Valores de pH do lixiviado dos reatores .....	53
Gráfico 4 - Valores de concentração de ácidos voláteis do lixiviado dos reatores ....	54
Gráfico 5 - Valores da DQO do lixiviado dos reatores.....	54
Gráfico 6 - Valores de condutividade elétrica do lixiviado dos reatores. ....	55
Gráfico 7 - Concentração de nitrogênio amoniacal para o lixiviado dos reatores.....	56
Gráfico 8 - Variação da concentração de sólidos totais no lixiviado dos reatores .....	57
Gráfico 9 - Variação da concentração de sólidos voláteis no lixiviado dos reatores .	57
Gráfico 10 - Produção de biogás nos reatores R2 e R3.....	60
Gráfico 11 - Produção acumulada de biogás ao longo do experimento nos reatores R2 e R3.....	60



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição gravimétrica do resíduo coletado no Brasil em 2012.....	19
Tabela 2 - Constituintes típicos do biogás produzido em aterros sanitários.....	26
Tabela 3 - Parâmetros do lixiviado de diferentes aterros sanitários brasileiros.....	28
Tabela 4 - Variação de parâmetros do lixiviado no aterro localizado em Kootenay County - Idaho, Estados Unidos, antes e após implementação de recirculação de lixiviado .....	31
Tabela 5 - Composição gravimétrica do resíduo sólido urbano padrão .....	40
Tabela 6 - Parâmetros monitorados na fração orgânica da massa de resíduos .....	43
Tabela 7 - Parâmetros analisados no lixiviado .....	43
Tabela 8 - Caracterização da fração orgânica inicial e final dos reatores .....	49

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Ca <sup>2+</sup>	Íon Cálcio
Cd <sup>2+</sup>	Íon Cádmio
CEMA	Conselho Estadual do Meio Ambiente do Paraná
CH <sub>4</sub>	Metano
Cl <sup>-</sup>	Íon Cloro
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
COT	Carbono Orgânico Total
Cr <sup>3+</sup>	Íon Cromo
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EUA	Estados Unidos da América
Fe <sup>2+</sup>	Íon Ferro
HAc	Ácido Acético
HCO <sub>3</sub>	Íon Carbonato
IAP	Instituto Ambiental do Paraná
IAPAR	Instituto Agrônômico do Paraná
K <sup>+</sup>	Íon Potássio
Mg <sup>2+</sup>	Íon Magnésio
Mn <sup>2+</sup>	Íon Manganês
Na <sup>+</sup>	Íon Sódio
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Íon Amônia
Ni <sup>2+</sup>	Íon Níquel
NO <sub>2</sub>	Dióxido de Nitrogênio
NO <sub>3</sub>	Nitrato
Pb <sup>2+</sup>	Íon Chumbo
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PU	Polituretano
RSU	Resíduo Sólido Urbano

RSUp	Resíduo Sólido Urbano Padrão
SEMA	Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos
SISNAMA	Sistema Nacional do Meio Ambiente
SNVS	Sistema Nacional de Vigilância Sanitária
SO <sub>4</sub> <sup>2+</sup>	Íon Sulfato
ST	Sólidos Totais
SUDERHSA	Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental
SV	Sólidos Voláteis
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Zn <sup>2+</sup>	Íon Zinco

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	12
2. OBJETIVOS .....	14
2.1 OBJETIVO GERAL .....	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	15
3.1 DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS .....	15
3.2 DINÂMICA DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS .....	17
3.3 GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS .....	19
3.4 ATERRO SANITÁRIO .....	20
3.4.1 Digestão anaeróbia dos resíduos sólidos .....	22
3.4.2 Produção de biogás .....	25
3.4.3 Produção de lixiviado em aterros .....	27
3.4.4 Recirculação de lixiviado .....	29
4. MATERIAL E MÉTODOS .....	34
4.1 CONSTRUÇÃO DOS REATORES .....	34
4.2 PROCEDIMENTO OPERACIONAL DOS REATORES .....	37
4.3 PREPARAÇÃO DO RESÍDUO SÓLIDO URBANO PADRÃO .....	39
4.4 PREENCHIMENTO DOS REATORES .....	41
4.5 MONITORAMENTO DOS REATORES .....	42
4.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	44
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	45
5.1 ABERTURA DOS REATORES .....	45
5.2 MONITORAMENTO DA FRAÇÃO ORGÂNICA DA MASSA DE RESÍDUOS .....	49
5.3 MONITORAMENTO DO LIXIVIADO .....	50
5.4 MONITORAMENTO DO BIOGÁS .....	58
6. CONCLUSÃO .....	62
7. RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS .....	64
REFERÊNCIAS .....	65

## 1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento industrial, tecnológico e econômico observado nos últimos tempos e o conseqüente incremento na renda de grande parte da população, tem resultado no aumento do consumo de itens industrializados, onde estes, outrora necessários e renováveis, caracterizam-se pela sua superfluidade e obsolescência. Aliado ao aumento do consumismo tem-se o incremento da população urbana, instaurando o quadro atual de geração crescente de resíduos nas cidades, o que torna a sua destinação um dos maiores problemas enfrentados pelas administrações públicas.

O tratamento e a destinação adequados dos resíduos coletados são condições essenciais para a preservação da qualidade ambiental e da saúde da população. No Brasil observa-se uma evolução nesse sentido, sendo que em 2013, 58,26% dos resíduos coletados tiveram destinação final adequada (ABRELPE, 2013). Essa evolução significa um progresso nas políticas públicas de saneamento ambiental, porém muito ainda deve ser feito e aprimorado em relação à gestão de resíduos sólidos, visto que a sua geração tende a aumentar.

O lixiviado, líquido escuro decorrente da decomposição anaeróbia da fração orgânica dos resíduos sólidos, constitui-se um poluente agressivo ao ambiente, em razão da elevada concentração de compostos orgânicos, amônia, sais inorgânicos, e, em alguns casos, metais pesados, sua geração consiste num dos impactos mais significantes da deposição dos resíduos em aterros (PESSIN et al., 2002b; MARTINS, CASTILHOS JUNIOR, COSTA, 2010). Outro produto proveniente da degradação anaeróbia da matéria orgânica em aterros de resíduos é o biogás, composto por metano (50%) e dióxido de carbono (40%), ambos agravadores do efeito estufa, contribuindo com o aquecimento global (SILVA e CAMPOS, 2008; ICLEI, 2009).

A disposição final dos resíduos em aterros sanitários consiste em uma técnica adequada, com normas de operações específicas, que preveem a coleta e o tratamento do lixiviado, bem como a drenagem e a queima do biogás (MONTEIRO et al., 2001), sendo uma alternativa viável para reduzir os impactos decorrentes da

disposição inadequada de resíduos nos países em desenvolvimento, principalmente aqueles de grande extensão territorial e baixa densidade populacional (ICLEI, 2009).

A recirculação de lixiviado surge como uma forma de intensificar a degradação dos resíduos, a recuperação e utilização dos gases como fonte de energia e a redução dos impactos ambientais (CINTRA, 2003).

No Paraná, a resolução conjunta nº 01/2006 da Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos – SEMA, Instituto Ambiental do Paraná – IAP e Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (SUDERHSA) determina a recirculação de 100% do lixiviado gerado, independente do sistema de tratamento proposto, mantendo-se um sistema de tratamento em circuito fechado (PARANÁ, 2006). A resolução nº 86/2013 do Conselho Estadual do Meio Ambiente do Paraná - CEMA (PARANÁ, 2013), também cita a recirculação de lixiviado como um método de tratamento, podendo ser aplicado isoladamente ou combinado com outras técnicas.

Cintra (2003) chama a atenção para a pouca disponibilidade de informações teóricas em trabalhos científicos e tecnológicos a respeito da recirculação de lixiviado em aterros sanitários, sobretudo em relação à taxa de recirculação utilizada, principalmente para a realidade brasileira.

Dessa forma, a realização de pesquisas nesta área é de grande valia, pois além de contribuir com a geração de informações teóricas, serve como embasamento técnico para a operação da recirculação nos aterros sanitários, em cumprimento das legislações. Assim, a pesquisa visou avaliar a influência de diferentes taxas de recirculação de lixiviado no processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos e produção de biogás utilizando um reator anaeróbio como unidade de simulação de uma célula de aterro sanitário.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a influência de diferentes taxas de recirculação de lixiviado na digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos e produção de biogás utilizando um reator anaeróbio como unidade de simulação de uma célula de aterro sanitário.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar as características do lixiviado produzido no processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos e simulação de chuva nos reatores a partir de dados históricos da região.
- Verificar as características físico-químicas da fração orgânica da massa de resíduos sólidos, no início e no término do experimento.
- Analisar a produção de biogás.
- Avaliar, comparativamente, a influência da recirculação de lixiviado em diferentes regimes, no processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) na norma NBR 10.004 (2004a), que trata da classificação de resíduos sólidos, os define como:

Resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível. (ABNT, 2004).

Na definição apresentada por Tchobanoglous (2002), resíduos sólidos consistem em uma ampla variedade de materiais sólidos, líquidos em recipientes e materiais com conteúdo gasoso, que são descartados ou rejeitados por serem gastos, inúteis, sem valor ou estarem em excesso, resultantes de atividades industriais, comerciais, de operações de mineração e agricultura e de atividades da comunidade.

Monteiro et al. (2001) chamam atenção ao caráter relativo da definição de “lixo” bem como da sua característica de inservível, pois ao mesmo tempo em que um resíduo não apresenta nenhuma serventia para quem o descarta, para outro pode se tornar matéria-prima para um novo produto ou processo. Dessa forma, o lixo pode ser conceituado como tal somente quando da inexistência de mais alguém para reivindicar uma nova utilização dos elementos então descartados. Sendo assim, os autores definem resíduo sólido como “todo material sólido ou semissólido indesejável e que necessita ser removido por ter sido considerado inútil por quem o descarta, em qualquer recipiente destinado a este ato”.

A NBR 10.004 (ABNT, 2004a) classifica os resíduos quanto aos riscos que suas características físicas, químicas e infectocontagiosas constituem à saúde, provocando mortalidade ou então incidência de doenças, e ao meio ambiente, quando gerenciado de forma inadequada. De acordo com a norma, o processo de classificação dos resíduos envolve a identificação do processo e atividade que lhes



deu origem, seus constituintes e características, bem como a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido. O resíduo pode ser incluso nas seguintes classes:

- Classe I – Perigosos: resíduos que apresentam periculosidade devido a características como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.

- Classe II A – Não perigosos não inertes: resíduos que apesar de não perigosos possuem propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

- Classe II B – Não perigosos inertes: resíduos que, amostrados de forma representativa e submetidos a teste de solubilidade, de acordo com as NBR 10.007 (ABNT, 2004b) e 10.006 (ABNT, 2004c) respectivamente, não apresentam solubilização em concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

A classificação estabelecida pela norma preencheu a lacuna existente quanto à classificação dos resíduos segundo a sua periculosidade, trazendo inestimável auxílio, sobretudo no que se refere aos resíduos sólidos industriais, viabilizando o estabelecimento de procedimentos adequados quanto ao seu manuseio e destinação final correta (BIDONE e POVINELLI, 1999). No entanto, apesar do grande avanço para o gerenciamento dos resíduos sólidos que a norma representa, sua interpretação e aplicação ainda geram muitas dúvidas em seus usuários e partes interessadas (KAMINSKI, 2007; TAVARES e ROSA, 2012).

A classificação da Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei federal nº 12.305 instituída em 2010 (BRASIL, 2010), se dá segundo a origem:

- Resíduos domiciliares: originários de atividades domésticas em residências urbanas.

- Resíduos de limpeza urbana: originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana. De acordo com Monteiro et al. (2001) são resíduos em geral resultantes da natureza, como folhas, galhadas, poeira, solo e areia, e também aqueles descartados irregular e indevidamente pela população, como entulho, bens considerados inservíveis, papéis, restos de embalagens e alimentos.

- Resíduos sólidos urbanos: engloba os resíduos domiciliares e os resíduos de limpeza urbana.
- Resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: engloba os gerados nessas atividades.
- Resíduos dos serviços públicos de saneamento básico: engloba os gerados nessas atividades, exceto os resíduos sólidos urbanos.
- Resíduos industriais: os gerados nos processos produtivos e instalações industriais.
- Resíduos de serviços de saúde: os gerados nos serviços de saúde, conforme regulamento e normas estabelecidas pelos órgãos do Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA) e do Sistema Nacional de Vigilância Sanitária (SNVS).
- Resíduos da construção civil: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluindo os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis.
- Resíduos agrossilvopastoris: os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades.
- Resíduos de serviços de transportes: os originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira;
- Resíduos de mineração: os gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios.

### 3.2 DINÂMICA DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

Os resíduos sólidos apresentam grande diversidade e se originam das mais variadas atividades humanas. Suas características variam segundo os mesmos aspectos que diferenciam as comunidades entre si e as próprias cidades, são eles: aspectos sociais, econômicos, culturais, geográficos e climáticos (BIDONE e POVINELLI, 1999; MONTEIRO et al., 2001).

O conhecimento da produção e composição do resíduo em determinada comunidade fornece dados preliminares fundamentais para o seu gerenciamento

(MARTINS, ANDRADE, PRATES, 2009). A caracterização auxilia na definição das tecnologias de acondicionamento, estocagem, transporte, tratamento e disposição final que melhor se encaixam ao perfil do resíduo gerado, ajudando, inclusive, na determinação da viabilidade de implementação de processo de reciclagem (PESSIN et al., 2013).

No Brasil, segundo dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2013) entre 2012 e 2013 o aumento na geração de resíduos foi superior ao crescimento populacional, totalizando 76 milhões de toneladas em 2013. Fatores como evolução da população urbana, não cobrança pelos serviços de limpeza, o crescimento do produto interno bruto (PIB) e do poder aquisitivo da população, com conseqüente aumento do consumo, influenciam positivamente na geração de resíduos. Em 2009, a massa per capita de resíduos domiciliares e públicos coletados no Brasil variou de 0,77 kg/dia a 1,19 kg/dia, com valor médio de 0,96 kg/dia (CAMPOS, 2012).

Campos (2012) indica que fatores como a efetivação dos princípios da Política Nacional de Resíduos Sólidos, inserção de instrumentos econômicos para a indústria, municípios e população, cobrança pelo serviço de coleta proporcional à geração de resíduos e educação da população, podem contribuir com a redução da geração de resíduos. No entanto, atualmente estes são menos abrangentes do que aqueles que contribuem para a evolução da geração, devendo ser implantados no país de forma mais articulada e abrangente.

A composição gravimétrica apresenta a porcentagem, em peso, das várias frações dos materiais constituintes do resíduo sólido, resultando em categorias como matéria orgânica, papel, trapos, couro, plástico, metais, vidro, borracha, madeira e outros (BIDONE e POVINELLI, 1999). A Tabela 1 apresenta a composição do resíduo coletado em 2012 no Brasil.

Os percentuais de cada categoria variam entre as comunidades, refletindo seus padrões de consumo. A participação da matéria orgânica tende a diminuir em países desenvolvidos ou industrializados, isso se deve ao maior consumo de alimentos semipreparados pelos consumidores desses países (MONTEIRO et al., 2001), apesar de isso se traduzir em redução da massa de resíduos, devido ao menor peso específico das embalagens comparadas à matéria orgânica, implica

também na geração de resíduos sólidos de decomposição e processo de reciclagem mais complexos, como o isopor e Tetra Pack (CAMPOS, 2012).

**Tabela 1 - Composição gravimétrica do resíduo coletado no Brasil em 2012**

<b>Material</b>	<b>Participação (%)</b>
Metais	2,9
Papel, papelão, TetraPak	13,1
Plástico	13,5
Vidro	2,4
Matéria orgânica	51,4
Outros <sup>(1)</sup>	16,7
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>

**Fonte: ABRELPE (2012).**

**Notas:**

<sup>(1)</sup> A categoria outros se refere a qualquer material encontrado que não se enquadre à listagem de componentes pré-selecionada (MONTEIRO et al., 2001).

### 3.3 GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

Nas cidades de países em desenvolvimento, com urbanização muito acelerada, verificam-se déficits na capacidade financeira e administrativa das prefeituras em prover infraestrutura e serviços essenciais, entre eles a coleta e destinação adequada dos resíduos (JACOBI e BESEN, 2011).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) no artigo 9º estabelece a escala de prioridades para a gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e por fim, a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (BRASIL, 2010).

Para que a escala de prioridades seja cumprida, a lei incumbe a toda a sociedade - fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes, consumidores e titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos - a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, atribuindo a todos a missão de redução da geração de resíduos e minimização dos impactos à saúde e ao meio ambiente gerado pelo ciclo de vida dos produtos (RIBEIRO, 2011).

Com a PNRS, o acesso a recursos da união direcionados à gestão de resíduos sólidos passa a ser condicionado à elaboração de planos de resíduos sólidos em âmbitos nacional, estadual e municipal que erradiquem os lixões e apresentem metas gradativas de redução, reutilização e reciclagem, objetivando reduzir a quantidade de resíduos e rejeitos encaminhados para disposição no solo (JACOBI e BESEN, 2011).

Ribeiro (2011) salienta que não basta uma legislação adequada e completa, sem que esta seja cumprida e assimilada pela sociedade de uma forma geral. Portanto, programas de educação ambiental massivos são de fundamental importância para que o cidadão absorva a necessidade do cumprimento desta Lei e incorpore ao seu cotidiano atitudes como a contribuição com a coleta seletiva, redução do consumo para níveis sustentáveis, favorecimento da logística reversa e cobrança dos governantes de atitudes concretas para erradicação dos lixões, de forma que a Política Nacional de Resíduos Sólidos atinja seus objetivos.

A observância da escala de prioridades se dá por meio da gestão integrada e sustentável dos resíduos sólidos, onde uma rede integrada de soluções (tecnologias) satisfazem as necessidades locais a curto, médio e longo prazo. Para a disposição final em aterros sanitários, restam somente os resíduos não reutilizáveis, recicláveis ou recuperáveis, diminuindo o montante e a periculosidade dos resíduos encaminhados para estes locais (LIMA, 2005), proporcionando o aumento no tempo de vida útil dos aterros, evitando que novas áreas sejam destinadas a esse fim.

### 3.4 ATERRO SANITÁRIO

A maioria dos aterros de resíduos instalados no Brasil não possuem critérios de implantação, operação e de monitoramento ou, simplesmente, os gestores públicos não os adotam, tornando dificultoso o monitoramento dos líquidos percolados e gases gerados no processo de digestão anaeróbia dos resíduos dispostos (PESSIN et al., 2002a).

A Norma Brasileira NBR 8419 (ABNT, 1992), que trata da apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos, os define como:

Técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário. (ABNT, 1992).

Segundo Bidone e Povinelli (1999), o aterro sanitário consiste em:

Forma de disposição final de resíduos sólidos no solo, dentro de critérios de engenharia e normas operacionais específicas, proporcionando o confinamento seguro dos resíduos (...), evitando danos ou riscos à saúde pública e minimizando os impactos ambientais. (BIDONE E POVINELLI, 1999).

O aterro sanitário é o método de disposição final de resíduos mais utilizado no Brasil e em grande parte do mundo. Segundo dados da ABRELPE (2013), em 2013, 58,26% dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil tiveram esse destino. Ressalta-se, no entanto, que os 41,74% restantes equivalem a cerca de 79 mil toneladas diárias sendo encaminhadas a lixões e aterros controlados, que não possuem o conjunto de sistemas e medidas necessários para proteção do meio ambiente contra danos e degradações.

Um aterro sanitário pode ser conceituado como um reator bioquímico, onde os resíduos sólidos e a água constituem as principais entradas e o biogás e lixiviado as principais saídas (TCHOBANOGLIOUS, 2002). Segundo Cintra (2003) os aterros sanitários têm sido considerados, atualmente, como um método de tratamento dos resíduos, atuando na redução da carga orgânica e conseqüentemente na conversão da massa de resíduos em materiais ou substâncias mais estáveis às ações de espécies decompositoras.

Nos aterros sanitários modernos, uma série de aspectos de projeto e operação são incorporados a fim de minimizar os impactos ambientais (PESSIN et al., 2002a). Os aspectos construtivos envolvem sistemas de drenagem periférica e superficial para afastamento de águas de chuva, sistema de drenagem de fundo para coleta de lixiviado, sistema de tratamento para lixiviado drenado e sistema de drenagem e queima dos gases gerados durante o processo de degradação da matéria orgânica. Entre os aspectos operacionais tem-se a compactação dos resíduos dispostos e posterior recobrimento com argila, bem como o selamento e

impermeabilização das células de aterro após o alcance de sua altura útil (BIDONE e POVINELLI, 1999).

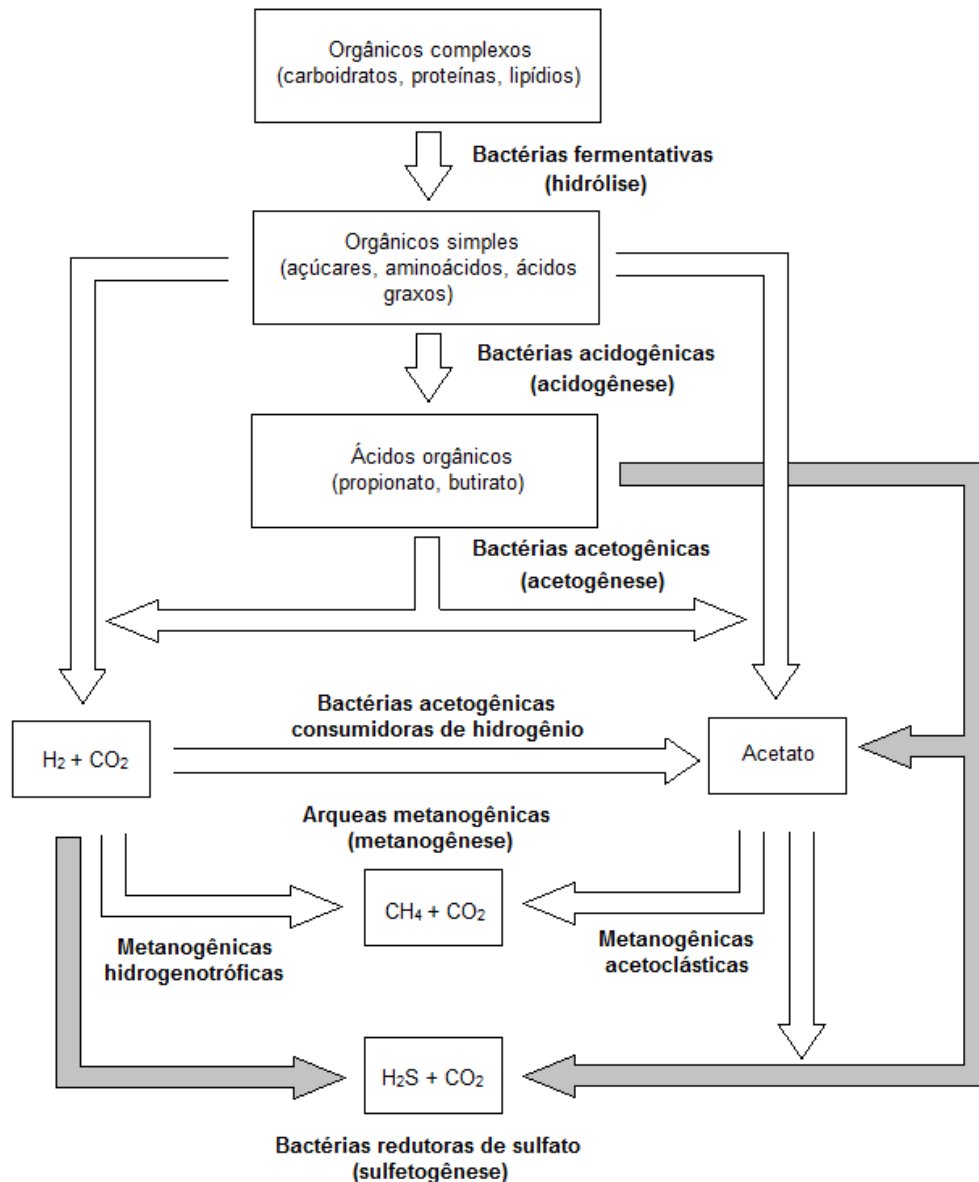
A má construção e operação dos aterros sanitários podem acarretar na emissão de poluentes com alto poder de contaminação do solo, águas superficiais e subterrâneas (LANGE et al., 2002; PICANÇO, 2004). Dessa forma, se faz necessária a seleção adequada da área de disposição e a determinação correta dos aspectos técnicos de operação, principalmente os que se referem ao tratamento e disposição do lixiviado produzido (CINTRA, 2003).

### **3.4.1 Digestão anaeróbia dos resíduos sólidos**

A decomposição biológica da fração orgânica dos resíduos sólidos, se dá por meio da ação de micro-organismos saprófitos ou decompositores naturalmente presentes no meio, podendo ocorrer na presença de oxigênio, processo aeróbio, e na ausência deste, processo anaeróbio (BIDONE e POVINELLI, 1999). Na digestão aeróbia os compostos orgânicos são oxidados, sendo convertidos em água, gás carbônico e sais minerais; já na digestão anaeróbia a matéria orgânica resulta em subprodutos como o metano, álcoois, sulfetos e amônia, passíveis de posterior oxidação (LIBÂNIO, 2002).

Após o esgotamento do volume limitado de ar disponível nos espaços vazios do leito de resíduos aterrados, a decomposição nos aterros sanitários ocorre em condições anaeróbias (SPONZA e AGDAG, 2003). Portanto os aterros sanitários são considerados sistemas biológicos predominantemente anaeróbios (PESSIN et al., 2002b), onde a digestão da matéria orgânica atua como um tratamento final para os resíduos dispostos (CINTRA, 2006).

O processo de digestão anaeróbia pode ser subdividido em diversas rotas metabólicas, com a participação de diversos grupos microbianos, cada qual com um comportamento fisiológico diferente (CHERNICHARO, 1997). Estes grupos trabalham em sequência, onde o produto de um, serve de substrato para outro (GERARDI, 2003). A Figura 1 representa o processo de digestão anaeróbia descrito nos parágrafos seguintes.



**Figura 1 - Rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia**  
**Fonte: Adaptado de Chernicharo (1997).**

A primeira fase da digestão anaeróbia consiste na hidrólise da matéria orgânica particulada. Esse processo transforma complexos polímeros em moléculas mais simples, como os açúcares, aminoácidos e ácidos graxos, sendo desempenhado pelas bactérias fermentativas hidrolíticas. Estas, por meio da excreção de exoenzimas, reduzem o tamanho das moléculas de forma que possam ser absorvidas pela parede celular (CHERNICHARO, 1997).

Por meio do metabolismo fermentativo, as bactérias acidogênicas metabolizam o material solúvel hidrolisado, convertendo-o em materiais ainda mais



simples, como os ácidos orgânicos (acético, propiônico e butírico), álcoois, cetona, dióxido de carbono e hidrogênio, importantes para os processos subsequentes (CHERNICHARO, 1997). O processo de formação de ácidos orgânicos reduz o pH do lixiviado (TCHOBANOGLOUS, 2002).

Entre os ácidos orgânicos produzidos na fermentação, o acetato (HAc), é o mais importante, pois é o principal substrato usado pelos micro-organismos metanogênicos. Este composto também é produzido na acetogênese, pelas bactérias sintróficas acetogênicas, que oxidam produtos da fermentação como o propionato e butirato em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono (GERARDI, 2003; INSAM et al., 2010).

Tem-se que as reações da acetogênese são inibidas termodinamicamente em concentrações elevadas de acetato e hidrogênio, necessitando que estes sejam consumidos pelos micro-organismos metanogênicos a fim desses manterem em baixas concentrações, estabelecendo uma cooperação mútua entre os grupos de micro-organismos (CHERNICHARO, 1997; INSAM et al., 2010).

As arqueas metanogênicas são micro-organismos anaeróbios estritos geralmente presentes na natureza. Desempenham um papel ecológico vital em ambientes anaeróbios ao remover o excesso de hidrogênio e os produtos da fermentação, produzidos em fases anteriores (CHERNICHARO, 1997).

A remoção de hidrogênio é feita principalmente pelos micro-organismos metanogênicos hidrogenotróficos, que representam quase a totalidade das espécies de arqueas metanogênicas, sendo capazes de produzir metano a partir do hidrogênio e gás carbônico (CHERNICHARO, 1997). O consumo de acetato, processo que implica em remoção de DQO, se dá pela sua conversão em metano pelas arqueas metanogênicas acetoclásticas. Apesar de ser um grupo pequeno entre as metanogênicas, são os micro-organismos predominantes na digestão anaeróbia, sendo responsáveis por cerca de 60 a 70% de toda a produção de metano (CHERNICHARO, 1997).

A conversão dos ácidos orgânicos e hidrogênio em metano e dióxido de carbono leva ao aumento do pH para valores próximos à neutralidade (TCHOBANOGLOUS, 2002).

Idealmente os produtos da acetogênese constituem substratos para as metanogênicas, no entanto, as bactérias sulforredutoras competem por esse

substrato, oxidando o hidrogênio e compostos orgânicos, na presença de sulfato, utilizando-o comoceptor final de elétrons. Esse processo produz acetato (oxidação incompleta) e gás sulfídrico e carbônico (oxidação completa), sendo os últimos passíveis de corrosão, emanação de maus odores e toxicidade do meio (INSAM et al., 2010). A ocorrência do processo de metanogênese ou sulfetogênese é determinado pela concentração de sulfato no meio (CHERNICHARO, 1997).

A eficiência do processo de digestão anaeróbia depende da igualdade entre as taxas de degradação nas fases que a compõem. A taxa de ocorrência da hidrólise influencia na disponibilidade de substratos para as fases subsequentes. A inibição da metanogênese promove a acumulação dos ácidos produzidos na fermentação e acetogênese, aumentando a acidez do meio. Por outro lado, o bom andamento da metanogênese, leva à quebra dos ácidos e formação de amônia, que após reagir com o gás carbônico e água resulta na produção de carbonato de amônia, tornando o meio ligeiramente alcalino (INSAM et al., 2010).

### **3.4.2 Produção de biogás**

A produção de biogás em aterros sanitários está relacionada com a quantidade de resíduos orgânicos presentes, a água pluvial infiltrada e a umidade presente nos resíduos (BRAZ e SILVA, 2001). O biogás produzido no processo de decomposição anaeróbia dos resíduos sólidos é composto por gases presentes em grandes quantidades, como o metano e dióxido de carbono, e em pequenas quantidades, como os gases traços, entre eles compostos orgânicos voláteis, que podem ser tóxicos e representar riscos à saúde pública (TCHOBANOGLOUS, 2002). A Tabela 2 apresenta uma típica composição do biogás emitido em aterros.

Apesar de ambos, metano e o dióxido de carbono, serem considerados gases de efeito estufa, o metano possui um potencial de aquecimento global 21 vezes superior ao do dióxido de carbono. Desde 1750 a concentração de metano na atmosfera aumentou 151%, sendo mais da metade de origem antropogênica e cerca de 3 a 4% decorrente dos aterros sanitários (IPCC, 2006).

**Tabela 2 - Constituintes típicos do biogás produzido em aterros sanitários**

<b>Componente</b>	<b>Percentual (em base seca)</b>
Metano	45-60
Dióxido de carbono	40-60
Nitrogênio	2-5
Oxigênio	0,1-1
Amônia	0,1-1
Enxofre e mercaptanas	0-0,1
Hidrogênio	0-0,2
Monóxido de carbono	0-0,2
Componentes traços	0,01-0,6

**Fonte: Tchobanoglous (2002).**

Por ser altamente combustível, o biogás necessita ser continuamente drenado dos aterros sanitários, a fim de evitar explosões nesses locais. Os sistemas de captação de biogás possuem eficiência de 40 a 60%, permitindo que parte do gás gerado atravessasse o sistema de cobertura dos resíduos escapando para a atmosfera (SILVA, FREITAS e CANDIANI, 2013). Além disso, o sistema de drenos abertos utilizado no Brasil, onde é mantida acesa uma chama para queima imediata do biogás que vai sendo naturalmente drenado, apresenta uma baixa eficiência. Estima-se que apenas 20% do biogás drenado seja efetivamente destruído pela queima, o restante é emitido para a atmosfera, emanando parcelas significativas de metano ao meio ambiente (ICLEI, 2009).

Segundo Tchobanoglous (2002) em condições normais, a taxa de decomposição dos resíduos pode ser inferida pela produção de biogás, onde esta atinge um pico nos primeiros dois anos, diminuindo gradualmente, mas podendo continuar por períodos de 25 anos ou mais. Ainda de acordo com o autor, o baixo teor de umidade ou a má distribuição desta na massa de resíduos, diminui a produção de biogás e estende o período de produção do mesmo. Dessa forma, faz-se importante a utilização de mecanismos de introdução de umidade nos aterros sanitários, como é o caso da recirculação de lixiviado, a fim de se manter o nível ótimo de umidade, que é da ordem de 45 a 60% e reduzir o tempo requerido para a estabilização dos resíduos (TCHOBANOGLIOUS, 2002).

Em função das ligações químicas entre os átomos de hidrogênio e carbono, o metano possui um elevado potencial energético (energia química): uma tonelada

de metano queimada possui potencial de produção de energia elétrica de cerca 4700 kWh, e 5400 kWh de energia térmica, constituindo um desperdício de energia renovável quando não utilizado (MANETTI, RACO e LIPPO, 2013).

O poder calorífico do biogás varia conforme a quantidade de metano existente. O aproveitamento de biogás pode se dar pela sua queima direta (aquecedores, esquentadores, fogões, caldeiras) e pela conversão em eletricidade, por meio da sua combustão dentro de motores que movem turbinas (PROSAB, 2003; SILVA e CAMPOS, 2008).

### 3.4.3 Produção de lixiviado em aterros

Lixiviado é o líquido que se acumula na parte inferior dos aterros resultante da percolação de água proveniente de fontes externas, associada ao chorume, líquido escuro, ácido e mal cheiroso, produzido na decomposição dos resíduos (BIDONE e POVINELLI, 1999; TCHOBANOGLIOUS, 2002). Em razão da elevada concentração de matéria orgânica e metais, o lixiviado de aterros sanitários constitui-se num poluente extremamente agressivo ao ambiente (PESSIN et al., 2002b).

Os lixiviados podem ser caracterizados como uma solução aquosa com quatro grupos de poluentes: material orgânico dissolvido (ácidos graxos voláteis e compostos orgânicos mais estáveis como ácidos húmicos e fúlvicos), macro componentes inorgânicos ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ), metais pesados ( $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ) e compostos orgânicos xenobióticos originários de resíduos domésticos e químicos presentes em baixas concentrações (hidrocarbonetos aromáticos, fenóis, pesticidas, entre outros) (PROSAB, 2009).

A vazão e as características do lixiviado estão intrinsecamente relacionadas e dependem: das condições climatológicas e hidrogeológicas existentes na região do aterro (precipitação pluviométrica e contribuições pelo escoamento superficial e subterrâneo), das características dos resíduos aterrados (umidade e composição química de seus constituintes) e da infraestrutura e condições de operação do aterro (existência de drenos para captação das águas superficiais, tipo de material utilizado

na cobertura das células de aterramento, pré-tratamento dos resíduos sólidos e recirculação ou não de lixiviados) (PROSAB, 2003).

A composição química do lixiviado varia também em função da idade do aterro e da fase de decomposição em que se encontra a massa de resíduos. No início do processo de degradação, fases acidogênica e acetogênica, o lixiviado caracteriza-se pelo baixo pH e altas concentrações de DBO, COT, DQO, nutrientes e metais pesados. Na fase mais evoluída do processo, fase metanogênica, a concentração de DBO, COT, DQO e nutrientes diminui substancialmente e o pH beira à neutralidade, reduzindo a solubilidade dos metais pesados e conseqüentemente a sua concentração no lixiviado (TCHOBANOGLIOUS, 2002).

A Tabela 3 apresenta as características do lixiviado de aterros sanitários brasileiros de diferentes localização, clima e tempo de operação.

**Tabela 3 - Parâmetros do lixiviado de diferentes aterros sanitários brasileiros.**

Parâmetros	Londrina (PR)	João Pessoa (PB)	Belo Horizonte (MG)	Jardim Gramacho (RJ)	São Leopoldo (RS)	Muribeca (PE)
Clima	Mesotérmico	Mediterrâneo	Tropical de altitude	Tropical	Subtropical	Tropical
Idade	33	6	21	30	-	23
Vazão (m <sup>3</sup> dia <sup>-1</sup> )	11-518	100	300-450	1300	11	86,4-864
Alcalinidade (mg L <sup>-1</sup> )	4.227	10.770	6.115	8.607	5.129	7.443
pH	-	8,3	8,2	8,4	7,8	8,2
DQO (mg L <sup>-1</sup> )	2.151	12.924	2.739	2.767	5.141	4.750
Nitrogênio amoniacoal (mg L <sup>-1</sup> )	713	2.004	1.175	1.547	826	1.492
ST (mg L <sup>-1</sup> )	7.669	16.331	-	11.878	-	10396
SV (mg L <sup>-1</sup> )	2.643	7.634	-	2.118	-	2.940
Cloreto (mg L <sup>-1</sup> )	-	-	2.314	3.822	-	469

Fonte: PROSAB (2009).

A dinâmica do processo de degradação dos resíduos associada a fatores ambientais e operacionais do aterro leva à sobreposição das etapas de estabilização dos resíduos dispostos, impedindo a detecção dos estágios de decomposição e a interpretação da sua evolução. Dessa forma, faz-se importante a observação da variação dos parâmetros ao longo do tempo, a fim de representar a evolução do processo de estabilização dos resíduos dispostos (PESSIN et al., 2002b).

A variabilidade nas características do lixiviado, somada à imprevisibilidade das vazões aplicadas e à elevada carga de poluentes, dificulta o tratamento desse efluente, o que faz com que a geração de líquidos lixiviados constitua-se na principal preocupação quanto à degradação ambiental de áreas localizadas próximas ao local de disposição final de resíduos sólidos (PROSAB, 2003).

#### **3.4.4 Recirculação de lixiviado**

Os aterros sanitários devem ser operados de forma que os impactos ambientais sejam minimizados e que a degradação dos resíduos seja otimizada (SAN e ONAY, 2001). Dessa forma, a recirculação de lixiviado consiste em um meio de se melhorar as condições ambientais dos aterros sanitários, promovendo maior estabilização dos resíduos sólidos, bem como o tratamento do lixiviado movimentando-o através do aterro (REINHART e AL-YOUSFI, 1996).

A PNRS prevê que os planos estaduais e municipais de resíduos sólidos estabeleçam normas e diretrizes para a disposição final de resíduos (BRASIL, 2010). No Paraná, a resolução conjunta nº. 01/2006 da Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos – SEMA, Instituto Ambiental do Paraná – IAP e Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental - SUDERHSA, determina a recirculação de 100% do lixiviado gerado, independente do sistema de tratamento proposto, mantendo-se um sistema de tratamento em circuito fechado (PARANÁ, 2006). A resolução nº 86/2013 do Conselho Estadual do Meio Ambiente – CEMA, também cita a recirculação de lixiviado como um método de tratamento do mesmo, podendo ser aplicado isoladamente ou combinado com outras técnicas de tratamento (PARANÁ, 2013).

A inoculação na digestão anaeróbia da massa de resíduos atua na aceleração dos processos bioquímicos relacionados à estabilização da fração orgânica dos resíduos aterrados, proporcionando o prolongamento no tempo de vida útil dos aterros e diminuindo o tempo necessário de monitoramento destes após o encerramento das operações. A recirculação consiste num processo de inoculação de biomassa endógena, que tem como vantagem o fato de já estar aclimada ao substrato e aos fatores de inibição, caracterizando-se em uma das técnicas mais conhecidas e empregadas na promoção da digestão acelerada dos resíduos sólidos urbanos confinados em aterros (PROSAB, 2003).

O aumento no teor de umidade, proporciona a redistribuição de substratos e nutrientes e dispersão de micro-organismos, bem como a correção do pH e a inserção de organismos metanogênicos, resultando no aumento da taxa de produção de metano, e analogamente da taxa de degradação dos resíduos (PROSAB, 2003; SANPHOTI et al., 2006).

Com a recirculação o aterro sanitário pode ser visto como um filtro anaeróbio relativamente controlado para o tratamento do lixiviado (SAN e ONAY, 2001), promovendo a redução de sua carga orgânica ao diminuir a concentração de DBO e DQO e converter ácidos orgânicos em  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$ . A produção de metano, por sua vez, leva ao aumento do pH, precipitando os metais contidos no lixiviado fazendo com que estes fiquem retidos entre os resíduos (THOBANOGLIOUS, 2002; BAGCHI, 2004).

A aceleração da estabilização da massa de resíduos e tratamento do lixiviado podem ser constatados na comparação da taxa de decaimento na concentração de DQO, em situações de recirculação de lixiviado e não recirculação, tanto em experimentos em pequena escala quanto em aterros reais. Dados indicam uma meia vida de DQO de 10 anos para aterros convencionais e de 230-380 dias para aterros com recirculação (REINHART e AL-YOUSFI, 1996). A redução do poder de poluição do lixiviado a uma taxa mais rápida, através da recirculação, diminui o risco de contaminação de recursos hídricos quando na ocorrência de vazamento de lixiviado em aterros e acarreta na redução dos custos de tratamento do mesmo (THOBANOGLIOUS, 2002).

Todavia, a remoção de parâmetros conservativos como o cloreto, que nos aterros convencionais se dá por meio da lavagem da massa de resíduos, nos

aterros providos de recirculação só ocorre quando há a descarga do lixiviado para tratamento e disposição. Dessa forma, em aterros convencionais a concentração de cloreto no lixiviado diminui no decorrer do tempo, enquanto que em aterros com recirculação os valores permanecem constantes ou reduzem lentamente (REINHART e AL-YOUSFI, 1996).

A implementação de recirculação de lixiviado no aterro sanitário da cidade Kootenay County, localizada no estado de Idaho, EUA, no início de 1995 promoveu a redução de vários parâmetros do lixiviado no intervalo de 9 meses, como pode ser constatado na Tabela 4.

**Tabela 4 - Variação de parâmetros do lixiviado no aterro localizado em Kootenay County - Idaho, Estados Unidos, antes e após implementação de recirculação de lixiviado**

Parâmetro	Antes da recirculação (06/01/1995) (mg L <sup>-1</sup> )	Após a recirculação (21/09/1995) (mg L <sup>-1</sup> )
DBO	3891	121
DQO	7230	1040
Sólidos suspensos	898	93
NO <sub>2</sub> e NO <sub>3</sub> como N	0,41	0,15
Cloreto	951	1200
Sulfato	320	88
COT	2440	1160
Ferro	46	5,1
Manganês	1,96	0,58
Zinco	1,31	0,05

**Fonte: Miller e Emge (1996) apud Tchobanoglous (2002).**

Para que a aceleração da degradação do resíduo seja efetivada a taxa de recirculação deve ser escolhida cuidadosamente. Taxas elevadas promovem a solubilização dos resíduos novos e a aceleração do estabelecimento de condições metanogênicas (THOBANOGLIOUS, 2002). Porém, se muito lixiviado for recirculado pode ocorrer um desbalanceamento entre as fases acidogênica e metanogênica, levando ao acúmulo de ácidos orgânicos e álcool, tornando o meio tóxico para os organismos metanogênicos (SPONZA e AGDAG, 2003).



San e Onay (2001), ao avaliarem o impacto de diferentes regimes de recirculação de lixiviado na degradação dos resíduos sólidos em um reator anaeróbio de resíduos sólidos, constataram que o aumento na frequência de recirculação de lixiviado promoveu a aceleração da decomposição dos resíduos e tratamento do lixiviado. No entanto, os autores alegaram que a manutenção constante de uma taxa elevada pode levar à ocorrência de saturação, alagamentos da superfície e entupimentos, especialmente em áreas com intensa precipitação, desestabilizando a massa de resíduos.

Dessa forma, os autores indicam a combinação de diferentes regimes de operação para a melhor estabilização do resíduo, iniciando a uma taxa elevada, permitindo o aumento da umidade e o estabelecimento da população microbiana, diminuindo-a após a obtenção de concentrações de metano significantes. Contrariando-os, Reinhart e Al Yousfi (1995) alegaram que taxas pequenas e menos frequentes deveriam ser aplicadas durante a fase acidogênica, a fim de evitar efeitos inibidores no processo de degradação dos resíduos, devido ao fato da acidogênese ser mais pronunciada em sistemas com recirculação. Taxas de recirculação mais elevadas poderiam ser empregadas durante a metanogênese.

A recirculação direta de lixiviado permite o retorno de micro-organismos decompositores em suspensão no líquido e a sua manutenção junto à massa de resíduos. O uso desse procedimento é interessante durante a fase inicial de implantação de aterros ou quando na existência de condições climáticas (baixa pluviometria e/ou elevada evapotranspiração) e geotécnicas (predominância de zonas não-saturadas) favoráveis, que permitam a recirculação de todo volume de lixiviado drenado (PROSAB, 2003).

A impossibilidade de recirculação do volume total de lixiviado implica na necessidade de tratamento, que pode ser por via aeróbia ou anaeróbia, com posterior recirculação. No caso de tratamento por reatores anaeróbios, ocorre a recirculação contínua da fase líquida e o retorno do lodo biológico produzido, permitindo a inoculação da massa de resíduos ao mesmo tempo em que corrige a acidez do lixiviado (PROSAB, 2003; CINTRA, 2003).

Tendo em vista a necessidade de um gerenciamento de resíduos sólidos eficaz, que gere um mínimo de impacto ambiental e que atenda às normas e legislações vigentes, tem-se a necessidade de realizar trabalhos que forneçam

embasamento técnico e teórico para o aprimoramento das estratégias utilizadas pelas gestões municipais ou empresas que operam aterros sanitários. A técnica de recirculação de lixiviado em aterros sanitários, no entanto, ainda não foi investigada com maior intensidade, principalmente para a realidade brasileira, sendo pouca a disponibilidade de informações teóricas em trabalhos científicos e tecnológicos (CINTRA, 2003).

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

A presente pesquisa, de caráter experimental, consistiu na construção e operação de reatores anaeróbios sob diferentes condições e no monitoramento físico-químico da massa de resíduos sólidos e do lixiviado produzido, bem como a quantificação da produção de biogás.

### 4.1 CONSTRUÇÃO DOS REATORES

A construção dos reatores anaeróbios de resíduos sólidos urbanos (RSU) baseou-se nos trabalhos realizados por Cintra (2003), Souto (2005), Barcelos (2009), entre outros, com adaptações. Os reatores anaeróbios, em escala de laboratório, tinham por objetivo simular os processos envolvidos em uma célula de aterro sanitário.

Os reatores foram construídos a partir de recipientes de polietileno de alta densidade, com 49 cm de altura, 35 cm de diâmetro e volume de aproximadamente 47 litros, dotados de tampa de pressão e anel metálico para vedação. Na Figura 2 pode-se observar o reator confeccionado.

Na tampa dos reatores foi instalado um sistema para a simulação de chuva, recirculação de lixiviado e condução do biogás ao gasômetro (Figura 3a). Na parte externa o sistema era composto por registro hidráulico e conexão para mangueiras de poliuretano (PU), peça com entrada própria à mangueira de 6 mm de diâmetro, utilizada para introduzir o lixiviado e a água, simulando chuva, bem como conduzir o biogás do reator ao gasômetro (Figura 3b). Na parte interna, havia um distribuidor dos líquidos inseridos, para que estes atingissem de forma homogênea a superfície de preenchimento dos reatores (Figura 3c).

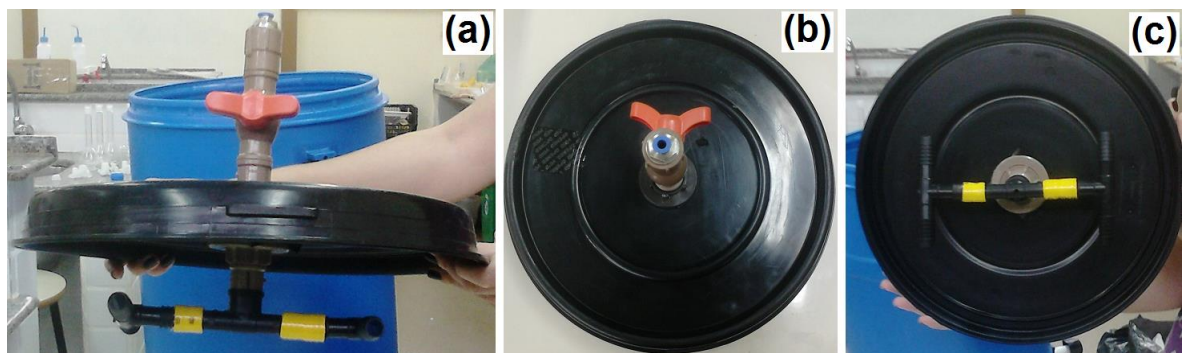
Na parte inferior dos reatores foi instalada uma torneira que funcionou como um coletor de lixiviado. Na entrada da torneira, voltada para a parte interna do reator foi colocada uma tela para impedir a obstrução da mesma por brita (Figura 4).

O sistema utilizado para a quantificação da produção de biogás funcionou pelo método de deslocamento de volume, em que o biogás produzido nos reatores era conduzido para um galão de 5 litros preenchido com água (gasômetro). O volume de gás, ao entrar no gasômetro, deslocava igual volume de água para outro recipiente, possibilitando a leitura da produção por meio da medição do incremento de volume de água no recipiente. Na Figura 5 pode-se observar o sistema.



**Figura 2 - Reator confeccionado para o experimento**

Fonte: Autora.



**Figura 3 - Em (a) sistema para introdução e distribuição de lixiviado e água e condução do biogás, em (b) vista da parte externa do sistema e em (c) vista da parte interna do sistema.**

Fonte: Autora.



Figura 4 - Tela colocada da entrada interna da torneira para impedir sua obstrução.

Fonte: Autora.

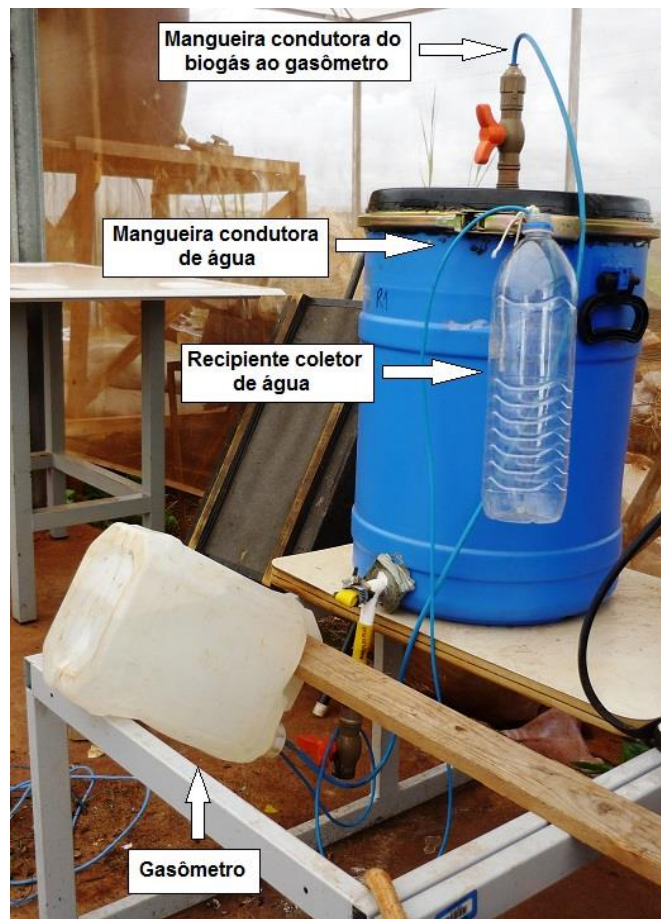


Figura 5 - Sistema para medição da produção de biogás.

Fonte: Autora.

## 4.2 PROCEDIMENTO OPERACIONAL DOS REATORES

Foram utilizados três reatores, submetidos a diferentes condições operacionais:

- Aterramento convencional com recirculação de lixiviado a uma taxa variável de 100% do volume de lixiviado produzido (R1).
- Aterramento convencional com recirculação de lixiviado a uma taxa variável de 50% do volume de lixiviado produzido (R2).
- Aterramento convencional sem recirculação de lixiviado, atuando como reator controle (R3).

Os reatores foram instalados na casa de vegetação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como mostra a Figura 6.



**Figura 6 - Reatores instalados na casa de vegetação da universidade**

**Fonte: Autora.**

No início da operação dos reatores, água, simulando chuva, foi inserida diariamente, a fim de umedecer a massa de resíduos, possibilitando a produção de



lixiviado. Após, a aplicação de água foi feita em dias intercalados com a recirculação. Ambas, recirculação e simulação de chuva, eram realizadas com uma seringa de 60 mL, com bico adaptado para manter o sistema vedado à entrada de ar, conforme Figura 7.

O volume de água utilizado na simulação de chuva foi determinado a partir de dados históricos de precipitação da cidade de Londrina obtidos junto ao Instituto Agrônomo do Paraná - IAPAR (2014). Levou-se em consideração os dados de precipitação anual, 1.608 mm, e de evaporação média anual, 1.425 mm, medida pelo evaporímetro de piche e corrigida através da multiplicação pelo fator 0,7. A precipitação anual encontrada, 610 mm, foi dividida igualmente entre os meses do ano, chegando-se a um valor mensal de 50,88 mm.

O valor mensal de precipitação multiplicado pela área da superfície transversal do reator resultou no volume de 4,88 L; este dividido por 15 dias de aplicação mensal, resultou em 0,326 L por aplicação. À água aplicada foi adicionada uma solução desclorificante para que não houvesse inibição do crescimento da comunidade microbiana.



**Figura 7 - Seringa utilizada para inserção de água e lixiviado**

**Fonte: Autora.**

A torneira coletora de lixiviado permaneceu aberta até o início da produção de lixiviado, sendo aberta depois somente nos dias em que era realizada a recirculação. A recirculação era feita a partir do esgotamento do lixiviado, medição do volume produzido e recirculação de acordo com o tratamento do reator: no R1

todo o lixiviado produzido era recirculado, no R2 metade do volume produzido era recirculado e no R3 todo o lixiviado produzido era descartado.

Já na segunda recirculação percebeu-se que o lixiviado coletado estava ácido, com pH médio de 3,87. Dessa forma, passou-se a realizar a correção do pH antes da recirculação, para valores entre 7 e 8 através da adição de uma solução de hidróxido de sódio 3 M. Tal solução foi substituída posteriormente por uma solução com concentração 6 M, a fim de diminuir o volume de solução adicionada aos reatores.

O experimento teve duração de 55 dias.

#### 4.3 PREPARAÇÃO DO RESÍDUO SÓLIDO URBANO PADRÃO

Trabalhou-se com resíduo sólido urbano padrão (RSUp), que teve composição gravimétrica baseada nos valores obtidos por Salsa (2013) para os resíduos gerados em um condomínio horizontal situado zona sul de Londrina, porém, com modificações de acordo com a disponibilidade das diferentes categorias de resíduos no momento da confecção. Na Tabela 5 apresenta-se a composição gravimétrica utilizada.

A fração orgânica do resíduo sólido urbano padrão foi obtida no restaurante universitário da Universidade e a coleta se estendeu por três dias, com cerca de 10 kg de resíduo coletado por dia, a fim de se garantir a diversidade dos alimentos que compunham a fração orgânica. Os resíduos eram compostos pelos alimentos resultantes do preparo das refeições (cascas de legumes, talos de verduras, cascas de ovos e carne crua) e do pós preparo (arroz, feijão, carne cozida, legumes cozido, verduras e cascas de frutas), além de borra de café e guardanapos úmidos. Após a coleta, os resíduos foram cortados em tamanhos menores, devido às dimensões reduzidas dos reatores, e homogeneizados em tambores plásticos (Figura 8).



Tabela 5 - Composição gravimétrica do resíduo sólido urbano padrão

Material	% em peso da categoria	Peso da categoria por reator	Peso total da categoria
Papel/papelão	10,54	1,50	4,50
Vidro	4,57	0,65	1,95
Metal	1,15	0,48	0,16
Plástico	5,23	0,74	2,22
Isopor	0,47	0,07	0,21
Orgânico	74,14	10,54	31,62
Outros <sup>(1)</sup>	3,90	0,55	1,65

**Fonte Autora.**

**Notas:**

<sup>(1)</sup> A categoria outros foi composta por maravalha e tecido, nas porcentagens de 75% e 25%, respectivamente.



**Figura 8 - Fração orgânica após homogeneização em tambor plástico**

**Fonte: Autora.**

Os demais materiais que compunham o resíduo também foram cortados em tamanhos menores (Figura 9), misturados ao resíduo orgânico e armazenados em tambores, para posteriormente serem utilizados no preenchimento dos reatores.



**Figura 9 - Materiais utilizados na composição do resíduo sólido urbano padrão: papel/papelão (a), vidro (b), metal (c), plástico (d), isopor (e), maravalha (f) e tecido (g)**

**Fonte: Autora.**

#### 4.4 PREENCHIMENTO DOS REATORES

Os reatores foram preenchidos no fundo com uma camada de 6 cm de brita número 0, atuando como dreno do lixiviado. Em seguida foi inserida uma camada de resíduo sólido urbano padrão compactado e novamente uma camada de 6 cm da mesma brita, visando uma melhor distribuição do lixiviado e da água da chuva, além da manutenção da compactação do resíduo.

A compactação dos resíduos se deu manualmente. O resíduo era pesado, inserido no reator e compactado através do impacto de um bloco de madeira maciça. A quantidade de resíduo inserida nos reatores foi: 12,33 kg no R1, 12,27 kg no R2 e 12,32 kg no R3, ocupando uma altura de 26 cm nos reatores, gerando uma compactação média de  $493,12 \text{ kg m}^{-3}$ .

Na Figura 10 pode-se observar o processo de preenchimento dos reatores e compactação dos resíduos. Após o preenchimento, os reatores foram tampados e suas entradas foram vedadas com veda calha, a fim de evitar o escape dos gases de dentro do reator.



**Figura 10 - Processo de preenchimento dos reatores em (a) e compactação dos resíduos em (b)**

**Fonte: Autora**

#### 4.5 MONITORAMENTO DOS REATORES

Foram monitorados: as características da massa de resíduos, a produção de biogás e o volume e características do lixiviado gerado.

A massa de resíduos foi monitorada em dois momentos: antes da sua inserção nos reatores e ao término do experimento. Cabe ressaltar que apenas a fração orgânica dos resíduos foi analisada, devido a esta ser a parte reativa dos resíduos sólidos urbanos no reator. Deste modo, as análises iniciais, em triplicata, foram feitas antes da mistura da fração orgânica aos demais materiais que compõem o RSUp.

Já as análises finais, em duplicata, foram realizadas após a abertura dos reatores e precedidas por um procedimento de separação manual da fração orgânica dos demais materiais. Exceto o papel/papelão e maravalha, devido à impossibilidade de separação por conta do estágio avançado de degradação dos resíduos orgânicos. Os parâmetros analisados são apresentados na Tabela 6.

A produção do biogás foi monitorada em dias alternados, salvo alguns momentos em que a leitura foi realizada em espaçamentos maiores devido à impossibilidade de visita aos reatores no dia determinado. O processo consistia na medição do volume de água deslocada e na reposição de água no gasômetro.

O monitoramento do lixiviado gerado ocorreu nos dias em que foi realizada a recirculação, onde o lixiviado acumulado era esgotado e o volume aferido. No momento da determinação do volume também era determinado o pH pelo método

eletrométrico 4500- H<sup>+</sup> B (APHA; AWWA e WEF, 2012), a fim de se verificar a necessidade de correção do lixiviado antes da recirculação.

As características físico-químicas do lixiviado foram monitoradas semanalmente. As amostras eram extraídas no momento da coleta do lixiviado para recirculação e armazenadas em ambiente refrigerado em recipientes plásticos. As análises foram realizadas em duplicata, os parâmetros analisados, bem como o período em que foram monitorados, são apresentados na Tabela 7.

**Tabela 6 - Parâmetros monitorados na fração orgânica da massa de resíduos**

Parâmetro	Método	Referência
Sólidos totais (ST) e sólidos voláteis (SV)	2540 G – Sólidos totais, fixos e voláteis em amostras sólidas e semissólidas.	APHA; AWWA e WEF (2012).
Carbono total	Utilizou-se fator de conversão	Carmo e Silva (2012)
pH	Método potenciométrico	Tedesco et al. (1995)
Condutividade	Método condutimétrico	Tedesco et al. (1995)
Nitrogênio total		Malavolta; Vitti; Oliveira (1997)

Fonte: Autora.

**Tabela 7 - Parâmetros analisados no lixiviado**

Parâmetro	Método	Referência	Período de análise
Sólidos totais	2540 B - Sólidos totais secos a 103-105°C		6 semanas
Sólidos voláteis	2540 E – Sólidos fixos e voláteis inflamados a 550°C		6 semanas
DQO	5220 D – Método colorimétrico, refluxo fechado	APHA; AWWA e WEF (2012)	6 semanas
Acidez volátil	2320 A – Método de titulação		4 semanas
Nitrogênio amoniacal	4500-NH3 B – Etapa da destilação preliminar		4 semanas
Condutividade elétrica	Método condutimétrico	Tedesco et al. (1995)	6 semanas

Fonte: Autora.

## 4.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados monitorados foram processados no programa Microsoft Excel 2010. Realizou-se o Teste t com intervalo de 95% de confiança nos dados de produção acumulada de lixiviado, para a comparação dos valores.



## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 ABERTURA DOS REATORES

A abertura dos reatores ocorreu após 55 dias. As tampas dos reatores foram retiradas, e, após a remoção da camada de brita superficial foi possível observar os resíduos (Figura 11). Uma amostra dos resíduos de cada reator foi coletada para a realização das análises laboratoriais.



**Figura 11 - Vista superior dos reatores após 55 dias**

**Fonte: Autora.**

Analisando-se o aspecto visual dos resíduos, foi possível perceber que o nível de degradação da matéria orgânica foi maior nos reatores em que foi realizada a recirculação. No R1 e R2 (Figuras 12 e 13 respectivamente), a maior parte da matéria orgânica estava imiscível, principalmente do papel/papelão, maravalha e tecido, sendo praticamente não identificável. Já no R3, a matéria orgânica, em sua

maioria, estava distinguível, sendo possível identificar pedaços de cascas, legumes e folhagens (Figuras 14 e 15).



**Figura 12 - Aspecto dos resíduos do reator 1 após o experimento**

**Fonte: Autora.**



**Figura 13 - Aspecto dos resíduos do reator 2 após o experimento**

**Fonte: Autora.**

Cintra (2003), que analisou a biodigestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos reais em reatores anaeróbios operando sem recirculação, com recirculação de líquido e com recirculação de líquido inoculado, obteve resultados semelhantes, tanto na maior incorporação da matéria orgânica nos materiais inertes nos reatores com recirculação, quanto na diferença de degradação entre os resíduos orgânicos de reatores com e sem recirculação, evidenciando a contribuição do emprego da técnica na degradação dos resíduos.



**Figura 14 - Aspecto dos resíduos do reator 3 após o experimento**

**Fonte: Autora.**

Outro importante aspecto observado foi a ocorrência de saturação da massa de resíduos do R1, onde todo o líquido gerado foi reintroduzido no reator. A alta compactação dos resíduos aliada ao maior volume de líquido inserido no R1 provocou a retenção de líquido, impedindo seu escoamento para o fundo do reator (Figura 16).





**Figura 15 - Cascas e pedaços de cenoura e folhas de couve pertencentes aos resíduos do reator 3**

**Fonte: Autora.**



**Figura 16 - Acúmulo de lixiviado na massa de resíduos do reator 1**

**Fonte: Autora.**

## 5.2 MONITORAMENTO DA FRAÇÃO ORGÂNICA DA MASSA DE RESÍDUOS

Na Tabela 8 são apresentados os dados obtidos na caracterização inicial da fração orgânica e das frações orgânicas obtidas nos reatores após a abertura, ao término do experimento.

A fração orgânica inicial caracterizou-se pelo alto teor de umidade e matéria orgânica biodegradável, elevada condutividade elétrica e baixo pH. Os resultados coincidem com os obtidos por Sotti (2014), que analisou a digestão anaeróbia dos resíduos orgânicos do restaurante universitário da UTFPR sozinhos e associados à efluente sanitário.

**Tabela 8 - Caracterização da fração orgânica inicial e final dos reatores**

Amostra	pH	Condutividade elétrica ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )	Sólidos totais (%)	Sólidos Voláteis (%)	Carbono orgânico total <sup>1</sup> (%)	Nitrogênio total (%)
Fração orgânica inicial	4,29	2187,33	24,25	94,20	43,06	5,35
R1	5,10	18,70	27,00	92,42	42,24	4,73
R2	5,44	16,19	32,50	93,87	42,91	3,35
R3	4,61	19,09	31,44	93,18	42,59	3,89

Fonte: Autora.

**Notas:**

<sup>(1)</sup> O carbono orgânico total foi determinado segundo metodologia de Carmo e Silva (2012) mediante utilização da equação:  $\text{COT} = 0,462 \text{ SV} - 0,550$ . Onde COT é o carbono orgânico total e SV são os sólidos voláteis.

Os valores de pH da massa de resíduos permaneceram ácidos durante o experimento, porém, com ligeiro aumento após o processo de digestão anaeróbia. Resultados semelhantes foram obtidos por Santos (2010) para resíduos sólidos orgânicos submetidos à digestão anaeróbia, em que os baixos valores de pH são

característicos da fase ácida do processo, devido à conversão da matéria orgânica hidrolisada em ácidos orgânicos, como o HAc (TCHOBANOGLIOUS, 2002).

A condutividade elétrica diminuiu substancialmente na massa de resíduos dos reatores, porém manteve-se alta no lixiviado. Acredita-se que a inserção de água tenha solubilizado os sais presentes nos resíduos, transferindo-os para o lixiviado, contribuindo para a elevação da sua condutividade elétrica.

Avaliando-se os sólidos totais tem-se que a digestão anaeróbia se deu por via seca, que ocorre com concentrações de sólidos totais entre 20% e 40% (PROSAB, 2003). Observou-se um aumento na concentração de sólidos totais no resíduo final e isto se deve ao processo de degradação, com perda de água pelo sistema de drenagem na forma de lixiviado, na forma de vapor d'água e na fração consumida na formação do biogás (SANTOS, 2010; SOTTI, 2014). O menor aumento na concentração de sólidos totais no R1 explica-se pela ocorrência de saturação da massa de resíduos decorrente do montante maior de líquido inserido no mesmo, onde foi feita a recirculação de todo o lixiviado produzido.

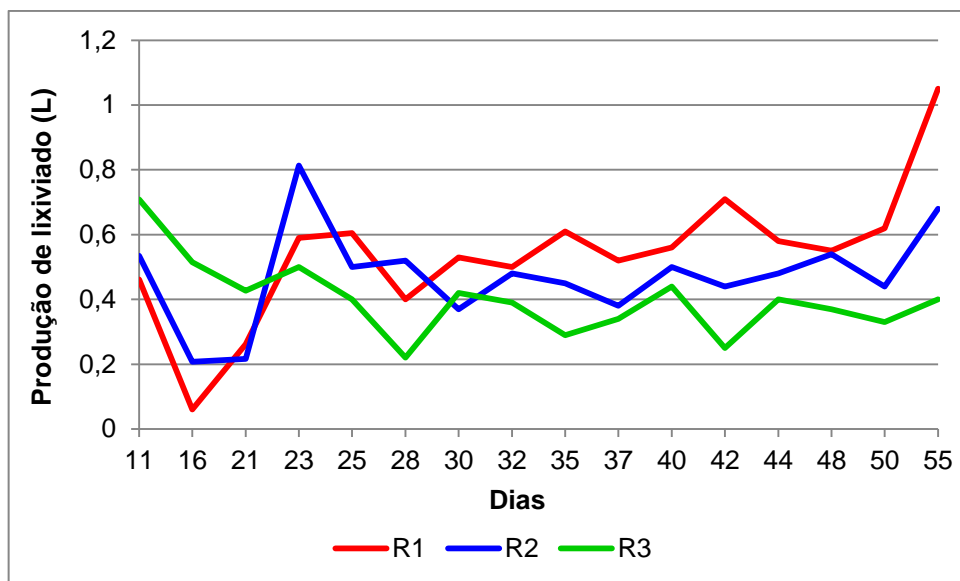
O teor de sólidos voláteis e COT foram menores nos três reatores em relação ao resíduo inicial, indicando a ocorrência da degradação dos resíduos. Os baixos valores de redução devem-se provavelmente ao incremento de material orgânico rico em carbono no material analisado, pois, como dito na metodologia, não foi possível separar a matéria orgânica do papel/papelão e da maravalha, na coleta da amostra.

Por fim, constatou-se redução nos teores de nitrogênio total dos reatores, indicando degradação da matéria orgânica presente. Cintra (2003) também observou redução de nitrogênio entre a massa inicial e final de seus reatores, porém em maior intensidade, o que se deve provavelmente ao maior tempo de duração de seu experimento.

### 5.3 MONITORAMENTO DO LIXIVIADO

A produção de lixiviado nos reatores é apresentada no Gráfico 1. Percebe-se grande variação ao longo do experimento nos reatores, seguindo, porém, uma

tendência de crescimento. Inicialmente a produção do R3 foi superior aos demais. Acredita-se que isso se deve à existência de um caminho preferencial de escoamento do lixiviado, pois o reator não recebia o incremento de lixiviado proveniente da recirculação. Dessa forma, realizou-se o giro do distribuidor de lixiviado do R3 no 17º dia de monitoramento, o que fez com que a produção de lixiviado diminuísse.

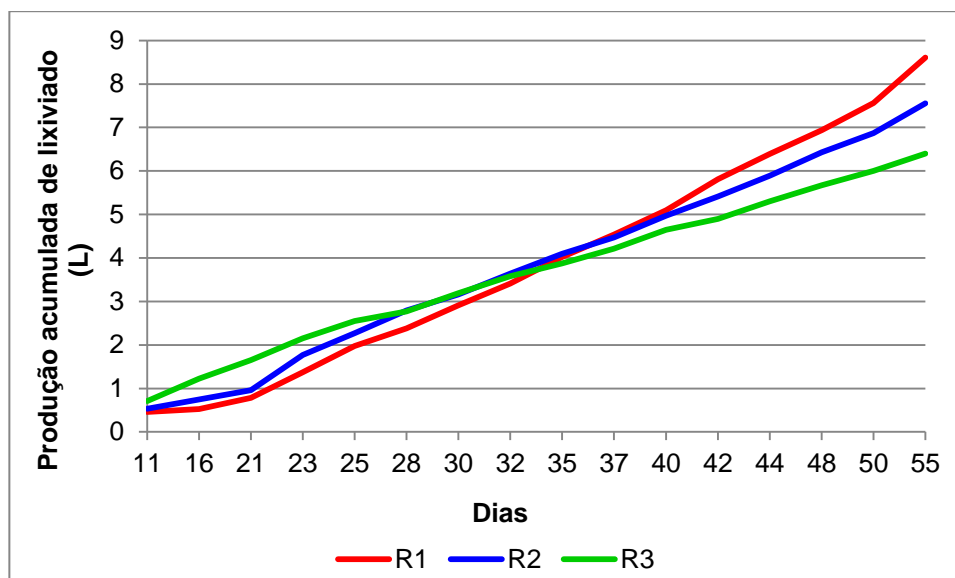


**Gráfico 1 - Volume de lixiviado produzido nos reatores.**

**Fonte: Autora.**

A produção acumulada de lixiviado nos reatores, apresentada no Gráfico 2, refletiu os tratamentos aplicados, ou seja, maior no R1, onde a recirculação é 100% e menor no R3, onde não houve recirculação. Entretanto, a variação da produção entre os reatores é pequena, ainda que o montante de líquido inserido seja muito diferente entre os reatores.

O pH do lixiviado (Gráfico 3), assim como do resíduo sólido, manteve-se baixo durante todo o experimento, evidenciando a predominância da fase ácida da biodigestão anaeróbia, uma característica de aterros jovens (TCHOBANOGLIOUS, 2002). Santos (2010) e Sam e Onay (2001) também obtiveram baixos valores de pH para períodos iguais ao deste experimento.

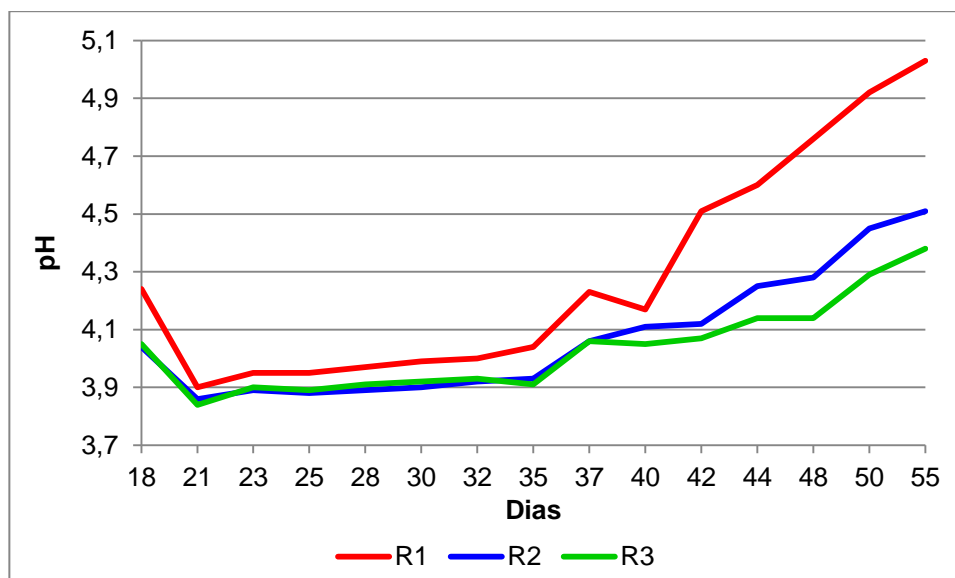


**Gráfico 2 - Produção acumulada de lixiviado ao longo do experimento nos reatores**

**Fonte: Autora.**

A queda inicial dos valores de pH deve-se ao estabelecimento das condições anaeróbias nos reatores e início da biodigestão anaeróbia, com consequente produção de ácidos orgânicos, dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e hidrogênio ( $\text{H}_2$ ). Posteriormente, observou-se o ligeiro aumento dos valores de pH, que provavelmente deve-se ao início da produção de biogás, onde os ácidos orgânicos,  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2$  são convertidos em gás metano ( $\text{CH}_4$ ) e  $\text{CO}_2$ , por meio da ação das bactérias metanogênicas (TCHOBANOGLIOUS, 2002; CHERNICHARO, 1997).

No início do experimento o comportamento do pH nos reatores foi semelhante. No entanto, o aumento passou a ser mais pronunciado nos reatores onde ocorreu a recirculação do lixiviado com pH corrigido, principalmente no R1, onde o volume de lixiviado inserido foi superior. Sam e Onay (2001), ao analisarem o efeito do emprego de diferentes taxas de recirculação de lixiviado na degradação dos resíduos em um reator anaeróbio, comparado a um mesmo reator operando sem recirculação, chegaram a resultados semelhantes ao deste trabalho: o reator operando com recirculação de lixiviado com pH corrigido a uma maior frequência de aplicação resultou em um aumento significativo no pH, passando de 5,92 para 7,30 em sete dias.



**Gráfico 3 - Valores de pH do lixiviado dos reatores**

Fonte: Autora.

Segundo Chernicharo (1997) valores de pH abaixo de 6,0 e acima de 8,3 devem ser evitados na biodigestão anaeróbia, pois podem inibir a atividade dos microrganismos metanogênicos. Por outro lado, as bactérias acidogênicas são muito menos sensíveis que as metanogênicas, mantendo sua atividade alta com valores de pH inferiores a 4,5. Isso faz com que a produção de ácido em um reator continue a aumentar, ainda que a produção de metano tenha cessado devido ao baixo pH, causando o “azedamento” do conteúdo do reator.

No Gráfico 4 são apresentados os valores de concentração de ácidos voláteis como HAc do lixiviado. É possível observar o aumento significativo na concentração de ácidos voláteis nos três reatores. Acredita-se que a maior concentração de ácidos voláteis nos reatores com recirculação deva-se ao seu acúmulo nos reatores, pois além da já citada produção elevada de ácido nos reatores, tem-se o incremento da inserção de um lixiviado com alta concentração de ácidos.

O comportamento dos parâmetros DQO e condutividade elétrica são apresentados nos Gráficos 5 e 6, respectivamente. De acordo com Tchobanoglous (2002), a dissolução dos ácidos orgânicos no lixiviado durante a fase ácida, leva ao aumento da DQO e da condutividade elétrica. Posteriormente, com a geração de biogás, consumo de ácidos e conseqüente aumento do pH, os valores de DQO e

condutividade elétrica tendem a reduzir. Observou-se um aumento na concentração de DQO e na condutividade elétrica nos três reatores logo no início, bem como uma queda dos mesmos no decorrer do experimento, exceto nos valores de condutividade elétrica do R1, que mantiveram o crescimento.

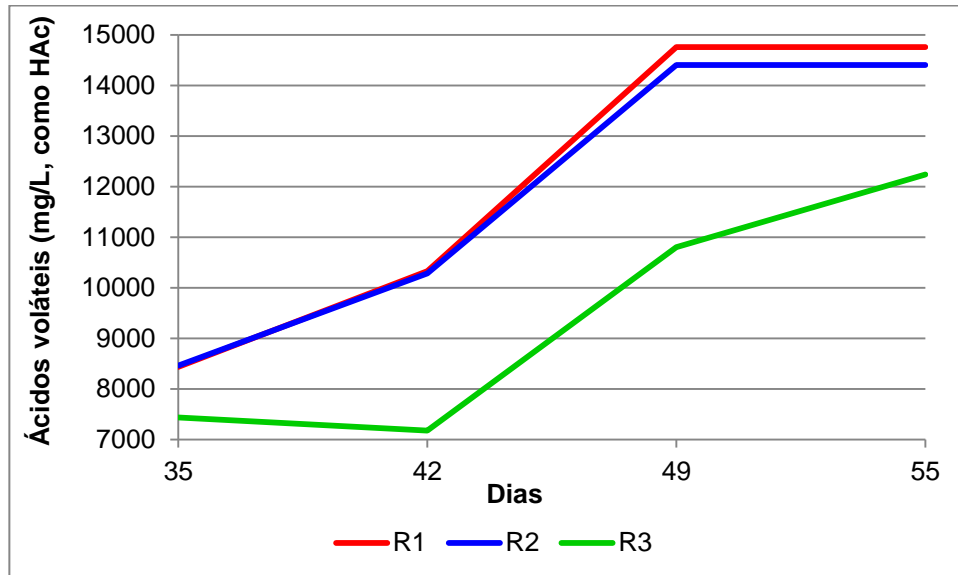


Gráfico 4 - Valores de concentração de ácidos voláteis do lixiviado dos reatores

Fonte: Autora.

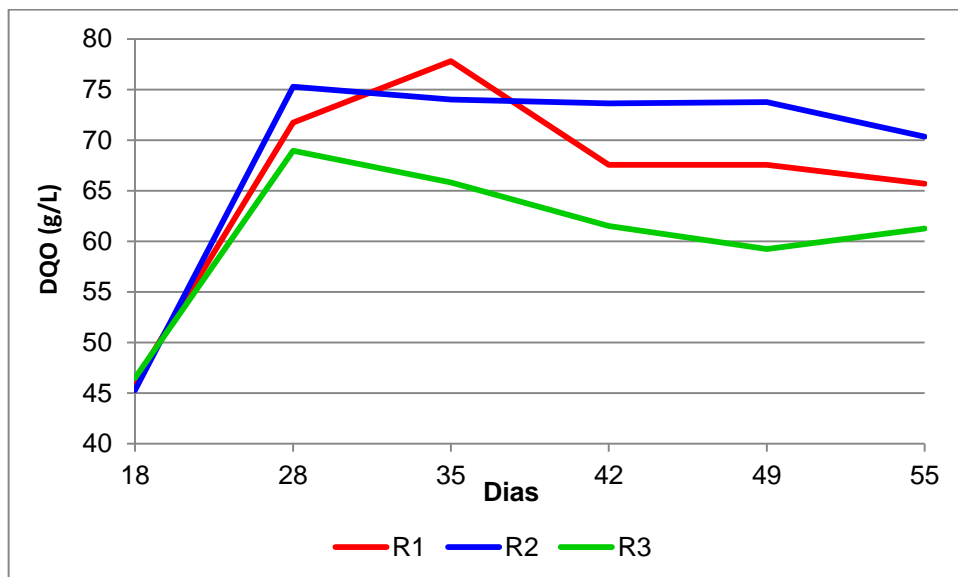
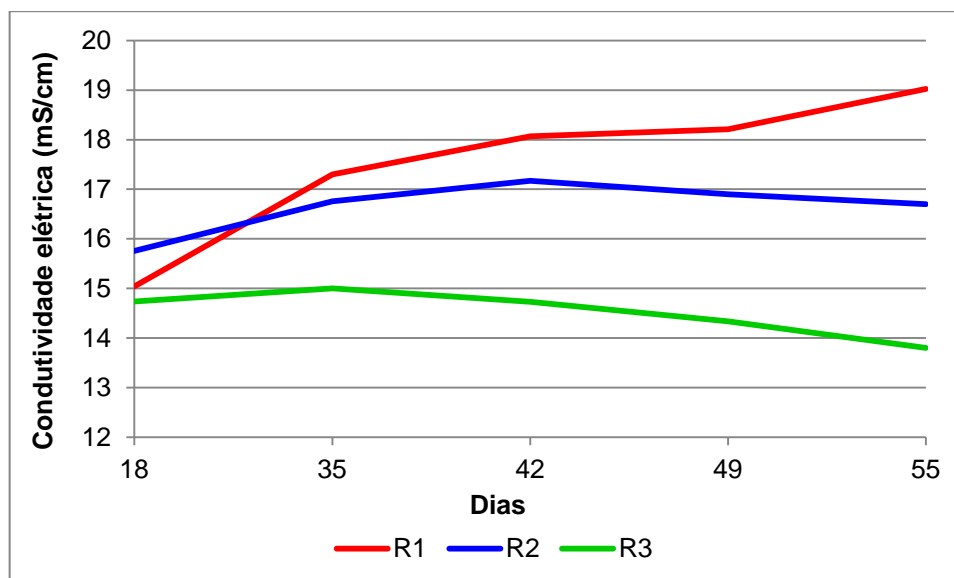


Gráfico 5 - Valores da DQO do lixiviado dos reatores

Fonte: Autora.



**Gráfico 6 - Valores de condutividade elétrica do lixiviado dos reatores.**

**Fonte: Autora.**

A concentração de DQO dos reatores encontra-se muito acima das observadas em aterros reais, no entanto altos valores de DQO também foram obtidos no trabalho de Sponza e Agdag (2003), que, como neste trabalho, testaram o efeito de duas taxas de recirculação e a não recirculação de lixiviado na degradação dos resíduos e produção de biogás. Os valores de DQO inferiores para R3, assemelham-se ao resultado obtido por Sam e Onay (2001), que justificaram o comportamento alegando a ocorrência de lavagem do reator em virtude da inserção de água.

Como já explanado no item 5.2 a dissolução dos sais presentes nos resíduos contribuiu para a alta condutividade elétrica observada no lixiviado dos reatores. Outro fator que pode ter exercido influência na alta condutividade elétrica em R1 e R2 foi o uso do NaOH na correção do pH do lixiviado, aumentando a concentração de sais, sobretudo em R1, devido ao grande volume recirculado. Segundo Santos (2010), elevadas concentrações de sais no lixiviado devem ser evitados, pois podem prejudicar os processos biológicos devido ao efeito osmótico sobre os microrganismos responsáveis pela degradação dos resíduos.

A variação da concentração de nitrogênio amoniacal no lixiviado dos reatores é apresentada no Gráfico 7. O aumento na concentração de nitrogênio amoniacal observado no início do experimento para todos os reatores deve-se à



decomposição da matéria orgânica contendo nitrogênio (SAM E ONAY, 2001; SANTOS, 2010). Os valores obtidos assemelham-se aos de Santos (2010), no entanto encontram-se muito abaixo dos dados descritos na literatura para lixiviado. Acredita-se que isso se deve ao curto período analisado, onde a degradação dos compostos nitrogenados não estava ainda muito pronunciada.

Os valores de nitrogênio amoniacal idênticos para R1 e R2 nas três últimas análises podem ser decorrentes de erros analíticos, pois devido às baixas concentrações de nitrogênio amoniacal dos reatores, a metodologia empregada não foi capaz de detectar uma variação entre os valores.

A constância da concentração de nitrogênio amoniacal para R1 e R2 nas duas últimas análises, bem como os menores valores de concentração para o R3, foram comportamentos também observados por Sam e Onay (2001) em seus reatores. Os autores alegam que a reintrodução de amônia nos reatores com recirculação de lixiviado é responsável por manter os valores de concentração constantes nas fases iniciais de degradação. Já em relação às menores concentrações no reator sem recirculação, mais uma vez os autores alegam que se deve à lavagem do reator pela inserção de água.

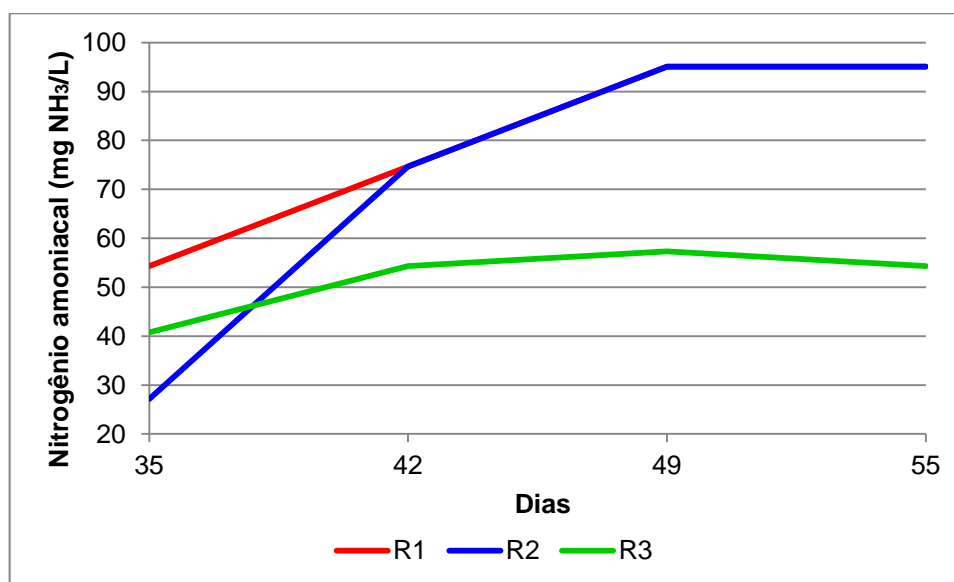


Gráfico 7 - Concentração de nitrogênio amoniacal para o lixiviado dos reatores

Fonte: Autora.

Em relação aos sólidos totais e sólidos voláteis (Gráficos 8 e 9 respectivamente), observou-se um decaimento na concentração dos mesmos nos reatores, indicando degradação da matéria orgânica presente nos resíduos, mais intensa no R3.

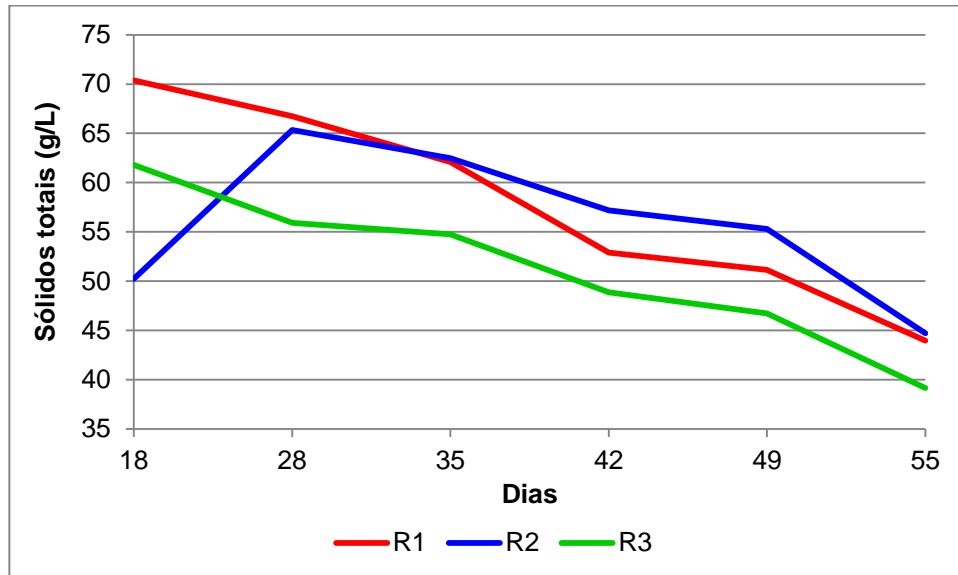


Gráfico 8 - Variação da concentração de sólidos totais no lixiviado dos reatores

Fonte: Autora.

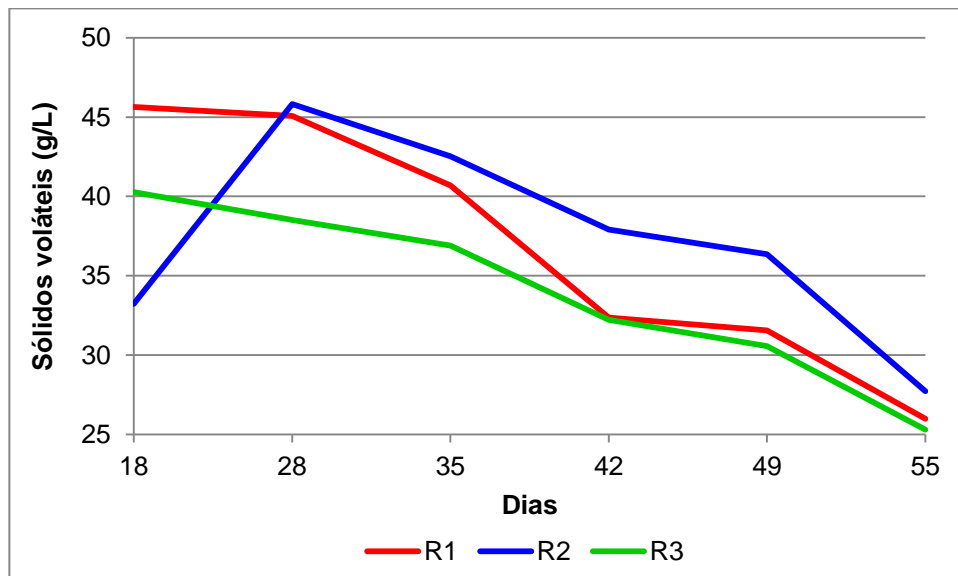


Gráfico 9 - Variação da concentração de sólidos voláteis no lixiviado dos reatores

Fonte: Autora.

Cintra (2003) afirma que os sólidos, principalmente os voláteis, são importantes indicadores da degradação de resíduos sólidos e que a DQO demonstra o grau de estabilização da matéria orgânica. Neste experimento observou-se que R1 obteve melhores resultados nestes parâmetros do que R2, o que poderia indicar melhor desempenho na degradação dos resíduos. No entanto, os maiores resultados de R1 quanto aos ácidos voláteis e à condutividade elétrica, parâmetros que interferem diretamente na atividade microbiana, fez com que este reator não obtivesse êxito na produção de biogás, como será apresentado no item 5.4.

Sponza e Agdag (2003) apresentaram uma justificativa para o melhor comportamento do R3 na maioria dos parâmetros analisados em relação aos reatores com recirculação. Segundo os autores a fase acidogênica tende a ser mais pronunciada nos aterros com recirculação, comparado aos aterros convencionais. Isto se deve ao maior teor de umidade e à distribuição uniforme desta na massa de resíduos, proporcionada pela recirculação, resultando num maior contato do lixiviado com os resíduos e conseqüentemente na maior concentração dos seus constituintes. Já nos aterros convencionais a pouca disponibilidade de umidade e a sua distribuição desigual leva à ocorrência de regiões secas na massa de resíduos e rotas preferenciais de escoamento, reduzindo a lixiviação dos resíduos e aumentando a lavagem, gerando um lixiviado de baixas concentrações.

#### 5.4 MONITORAMENTO DO BIOGÁS

O R1 em nenhum momento do experimento provocou o deslocamento de líquido no gasômetro, no entanto, ao se abrir o registro era possível perceber um leve alívio de pressão dentro do reator, indicando a produção de gás, porém, não em quantidade suficiente para gerar a pressão necessária para deslocamento do líquido. A possibilidade de vazamento do biogás no R1 foi descartada, já que foram realizados testes no reator e nenhum ponto de vazamento foi encontrado.

A recirculação de 100% do lixiviado produzido pode ter influenciado negativamente na atividade dos microrganismos envolvidos na geração de biogás.

Sponza e Agdag (2003) relataram que a recirculação de grandes volumes de lixiviado pode ocasionar um desbalanceamento entre as fases acidogênica e metanogênica da digestão anaeróbia, elevando a concentração de ácidos orgânicos voláteis e álcool, que, por sua vez, são tóxicos para os organismos metanogênicos. No Gráfico 4 é possível ver que a concentração de ácidos foi superior no R1, podendo ter ocasionado o azedamento do sistema e a inibição da metanogênese. Os autores chamaram atenção também para a possibilidade de ocorrência de saturação dos resíduos, fato observado no R1, e sua influência negativa sobre a atividade metanogênica.

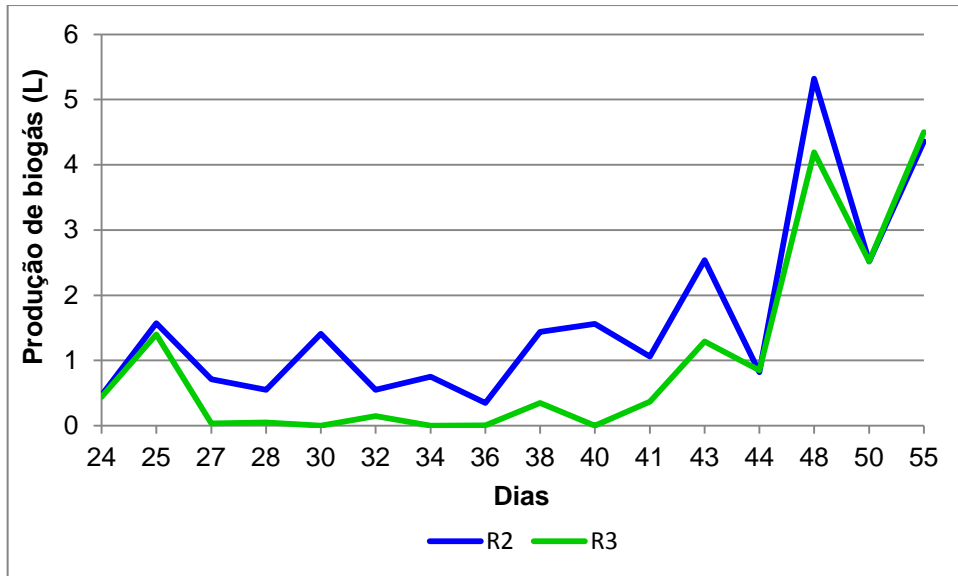
O aumento da condutividade também pode ser a causa da inibição da metanogênese no R1, pois como já explanado, altos valores de condutividade são decorrentes de altas concentrações de sais, que por sua vez produzem um efeito osmótico que afeta a atividade dos microrganismos responsáveis pela degradação dos resíduos (SANTOS, 2010). Dessa forma, a recirculação de grande quantidade de lixiviado com altas concentrações de sais em R1 pode ter ocasionado a inibição dos microrganismos metanogênicos.

Por fim, a baixa taxa de crescimento dos microrganismos metanogênicos (INSAM et al., 2010) aliada ao curto período de realização do experimento pode não ter sido suficiente para o estabelecimento da comunidade metanogênica em R1, não excluindo a possibilidade de produção de biogás no reator na ocorrência de um período maior de monitoramento.

Nos reatores R2 e R3 a geração de biogás iniciou-se no 24º dia após o seu fechamento. A variação na produção de biogás dos reatores é mostrada no Gráfico 10. É possível perceber que a produção do R2 foi superior à do R3 durante praticamente todo o experimento, sendo superada somente no último dia de leitura.

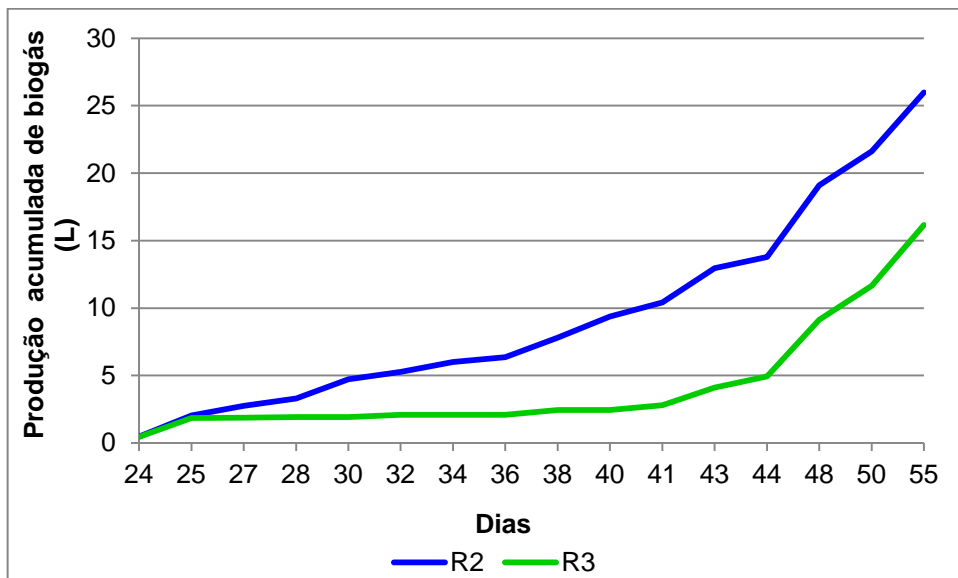
O Gráfico 11 apresenta a produção acumulada de biogás ao longo do experimento, sendo visível a superioridade de produção no R2, onde foi empregado a recirculação de 50% do lixiviado gerado, sobre o R3, onde não houve recirculação. Ao aplicar o Teste t com intervalo de 95% de confiança, obteve-se  $p$  menor que 0,05, comprovando que a produção acumulada de biogás de R2 e R3 se diferenciaram estatisticamente. Estando a taxa de degradação dos resíduos diretamente relacionada à produção de biogás (TCHOBANOGLIOUS, 2002), pode-se

concluir que recirculação de lixiviado no R2 a uma taxa de 50% contribuiu para a aceleração da degradação dos resíduos.



**Gráfico 10 - Produção de biogás nos reatores R2 e R3**

Fonte: Autora.



**Gráfico 11 - Produção acumulada de biogás ao longo do experimento nos reatores R2 e R3**

Fonte: autora.

A produção de biogás inferior no R3 evidencia a ocorrência de lavagem do substrato do reator, mencionada anteriormente. Nesta os nutrientes essenciais à atividade dos microrganismos são carreados, limitando a atividade microbiana e a estabilização dos resíduos (SAM e ONAY, 2001).

## 6. CONCLUSÃO

- A análise do aspecto visual dos resíduos após a abertura dos reatores permitiu concluir que a degradação foi mais intensa nos reatores com recirculação. Também se concluiu que a recirculação de 100% do lixiviado em R1 causou a saturação da massa de resíduos do reator.

- A partir dos resultados das análises físico-químicas da massa de resíduos, pode-se concluir que o processo de digestão anaeróbia promoveu a degradação da fração orgânica. No entanto, os resultados obtidos nos parâmetros analisados não mantiveram a mesma tendência de comportamento. Isto decorre da heterogeneidade dos resíduos e do curto período de duração do experimento. Ainda sim, percebe-se que os reatores com recirculação obtiveram os melhores resultados. O R2 obteve o melhor comportamento em relação ao aumento de pH, redução da condutividade elétrica e dos teores de sólidos totais e nitrogênio e o R1 o melhor comportamento em relação à redução dos teores de sólidos voláteis e carbono orgânico total.

- As análises do lixiviado demonstraram uma melhor qualidade do lixiviado proveniente do R3, no entanto isto é reflexo da lavagem da massa de resíduos pela inserção de água no reator realizando a diluição dos constituintes do lixiviado. Isto é comprovado pela ocorrência de caminhos preferenciais de escoamento no R3 no início do experimento e pela produção inferior de biogás do reator em relação ao R2, onde houve recirculação.

- O pior desempenho do lixiviado dos reatores com recirculação nos parâmetros analisados decorreu da intensificação da fase acidogênica. O ocorrido deve-se à maior lixiviação dos resíduos proporcionada pelo incremento de umidade, aumentando a concentração dos constituintes do lixiviado.

- A inibição da produção de biogás no R1 pode ser decorrente da alta taxa de recirculação. O grande volume de lixiviado adicionado pode ter promovido o desbalanceamento entre as fases acidogênica e metanogênica da digestão anaeróbia e o conseqüente acúmulo de ácidos; causado a saturação da massa de resíduos; e gerado o acúmulo de sais e conseqüente elevação da condutividade.

Estes efeitos provavelmente afetaram negativamente os microrganismos metanogênicos, impedindo a efetivação da fase metanogênica no reator.

- A baixa taxa de crescimento dos microrganismos metanogênicos e o curto período de realização do experimento pode não ter sido suficiente para o estabelecimento da comunidade metanogênica em R1.

- A produção acumulada de biogás no R2 e R3 se diferenciou estatisticamente, confirmando a superioridade da produção de R2. Através deste resultado é possível concluir que a recirculação do lixiviado gerado em R2 a uma taxa de 50% contribuiu para a digestão anaeróbia da fração orgânica dos resíduos e para a produção de biogás.



## 7. RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Para futuros trabalhos recomenda-se o monitoramento dos reatores por um período maior, a fim de acompanhar a evolução das fases de degradação anaeróbia dos resíduos e obter maior compreensão do comportamento dos parâmetros analisados sob os diferentes regimes empregados, podendo-se aferir com mais precisão sobre os efeitos destes na aceleração da degradação dos resíduos e na produção de biogás.

Indica-se também o uso de bombonas plásticas com tampas de rosca a fim de garantir-se mais facilmente a vedação do reator. Tampas de pressão cedem facilmente deixando que os gases escapem, sendo necessário grandes quantidades de cola para garantir a vedação.

Um fator que pode ajudar nas discussões dos resultados é a adaptação dos reatores para a coleta dos resíduos durante o experimento, como fez Santos (2010). O cruzamento dos dados da massa de resíduos e do lixiviado no decorrer digestão anaeróbia, auxilia na compreensão do processo.

Por fim, a determinação das concentrações de metano e dióxido de carbono no biogás é de suma importância para a averiguação da influência dos tratamentos empregados na degradação dos resíduos, uma vez que o grau de estabilização dos mesmos está diretamente relacionado à quantidade de metano produzido.

## REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8419: apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1992.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.004: resíduos sólidos - classificação. Rio de Janeiro, 2004a.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.007: amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004b.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10.006: procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004c.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo, 2012.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo, 2013.

APHA – American Public Health Association; AWWA – American Water Works Association; WEF – Water Environment Federation. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 22 ed. Washington: American Public Health Association, 2012.

BAGCHI, Amalendu. **Design of landfills and integrated waste management**. 3 ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2004.

BARCELOS, Beatriz R. de. **Avaliação de diferentes inóculos na digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos domésticos**. 2009. 75 f. Dissertação (Mestre em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

BIDONE, Francisco R. A.; POVINELLI, Jurandyr. **Conceitos básicos de resíduos sólidos**. 1 ed. São Carlos: EESC/USP, 1999.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**. Brasília, 3 ago. 2010.

BRAZ, José A.; SILVA, Celso L. Avaliação do potencial energético do biogás de aterro sanitário gerado pelos resíduos sólidos domésticos do município de Rio Claro. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. 21., 2001, João Pessoa. **Anais...** Florianópolis: 2001. Paginação irregular.

CAMPOS, Heliana K. T. Renda e evolução da geração per capita de resíduos sólidos no Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 17, n. 2, p. 171-180, abr/jun 2012.

CARMO, D.L. do; SILVA, C.A. Métodos de quantificação de carbono e matéria orgânica em resíduos orgânicos. **Revista Brasileira Ciências do Solo**, v.36, n.4, p. 1211-1220, 2012.

CHERNICHARO, Carlos A. L. **Reatores anaeróbios**. 2 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, 1997.

CINTRA, Ilka S. **Estudo da influência da recirculação de chorume cru e chorume inoculado na aceleração do processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos**. 2003. 352 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

GERARDI, Michael H. **The microbiology of anaerobic digesters**. 10 ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2003.

IAPAR. **Médias históricas em estações do IAPAR – Londrina**. Disponível em <[http://www.iapar.br/arquivos/Image/monitoramento/Medias\\_Historicas/Londrina.htm](http://www.iapar.br/arquivos/Image/monitoramento/Medias_Historicas/Londrina.htm)> Acesso em 26 nov. 2014.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Indicadores do desenvolvimento sustentável**. Rio de Janeiro, 2012.

ICLEI Brasil – Governos Locais para Sustentabilidade. **Manual para aproveitamento de biogás: volume um, aterros sanitários**. São Paulo, 2009.

INSAM, H. **Microbes at work: from wastes to resources**. New York: Springer, 2010.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Waste**. v. 5. Hayama: IGES, 2006.

JACOBI, Pedro R.; BESEN, Gina R. Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios da sustentabilidade. **Estudos Avançados**, v. 25, n. 71, p. 135-158, jan/abr 2011.

JIMÉNEZ, E.I.; GARCIA, V.P. Relationships between organic carbon and total organic matter in municipal solid wastes and city refuse composts. **Bioresource Technology**, v. 41, p. 265- 272, 1992.

KAMINSKI, Fernanda H. C. **Análise crítica da norma ABNT NBR 10004:2004 Resíduos Sólidos – Classificação**. 2007. 102 f. Dissertação (Mestre em Tecnologia Ambiental) – Instituto de Pesquisa Tecnológica de São Paulo, São Paulo, 2007.

LANGE, Celina L. et al. Estudo do transporte de contaminantes em meios porosos aplicado a aterros de disposição de resíduos sólidos urbanos. In. Projeto PROSAB. **Alternativas de disposição de resíduos sólidos urbanos para pequenas comunidades** (coletânea de trabalhos técnicos). 1. Rio de Janeiro: RiMa, ABES, 2002.

LIBÂNIO, Paulo A. C. **Avaliação da eficiência e aplicabilidade de um sistema integrado de tratamento de resíduos sólidos urbanos e de chorume**. 2002. 156 f. Dissertação (Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.

LIMA, José D. de. **Sistemas integrados de destinação final de resíduos sólidos urbanos**. 1 ed. ABES, 2005.

LONDRINA. Prefeitura do município de Londrina. **Plano municipal de saneamento básico de Londrina - PR: Diagnóstico -2008/2009**. Londrina, 2009. 476 p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2 ed. Piracicaba: Potafos, 1997.319p.

MANETI, Piero; RACO, Brunella; LIPPO, Giovanni. Efeitos ambientais e econômicos positivos associados ao monitoramento do chorume e das emissões de biogás em aterros. **Conexão Academia**. Vol. 2, n. 3, p. 09-15, 2012.

MARTINS, Cláudia L.; CASTILHOS JÚNIOR, Armando B.; COSTA, Rejane H. R. Desempenho de sistema de tratamento de lixiviado de aterro sanitário com recirculação do efluente. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 15, n. 4, p. 401-410, out/dez 2010.

MARTINS, Larissa F. V.; ANDRADE, Helisson H. B.; PRATES, Kátia V. M. C. Diagnóstico quali-quantitativo dos resíduos sólidos domiciliares gerados no assentamento rural Luz, Luziana/Paraná. **SaBios: Revista saúde e biologia**, v. 4, n. 2, p. 14-20, jul/dez 2009.

MONTEIRO, José H. P. et al. **Manual de Gerenciamento Integrado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: IBAM, 2001. 200 p.  
PARANÁ. Resolução conjunta SEMA/IAP/SUDERHSA nº 01 de 26 de agosto de 2006. Estabelece requisitos, critérios técnicos e procedimentos para a impermeabilização de áreas destinadas a implantação de Aterros Sanitários, visando à proteção e a conservação do solo e das águas subterrâneas. **Diário Oficial**. Curitiba, PR, 26 ago. 2006.

PARANÁ. Resolução CEMA nº 86 de 2 de abril de 2013. Estabelece diretrizes e critérios orientadores para o licenciamento e outorga, projeto, implantação, operação e encerramento de aterros sanitários, visando o controle da poluição, da contaminação e a minimização de seus impactos ambientais e dá outras providências. **Diário Oficial**. Curitiba, PR, 19 dez. 2013.

PEREIRA, Alexandre N. M. Estudo comparativo do gerenciamento municipal de resíduos e processos de reciclagem em São Paulo e Londres. **Conexão Academia**, Vol. 2, n. 3, p. 19-26, dez 2012.

PESSIN, Neide et al. Concepção e implantação de células piloto de aterramento de resíduos sólidos. In. Projeto PROSAB. **Alternativas de disposição de resíduos sólidos urbanos para pequenas comunidades** (coletânea de trabalhos técnicos). 1. Rio de Janeiro: RiMa, ABES, 2002a.

\_\_\_\_\_. Monitoramento do processo de digestão anaeróbia dos resíduos sólidos dispostos em duas células piloto de aterramento. In. Projeto PROSAB. **Alternativas de disposição de resíduos sólidos urbanos para pequenas comunidades** (coletânea de trabalhos técnicos). 1. Rio de Janeiro: RiMa, ABES, 2002b.

\_\_\_\_\_. Composição gravimétrica de resíduos sólidos urbanos: estudo de caso - município de Canela - RS. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL, 30., 2006, Punta del Este. Rescatando antiguos principios para los nuevos desafíos del milenio. Disponível em:< [http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/uruguay30/BR05416\\_Pessin.pdf](http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/uruguay30/BR05416_Pessin.pdf)> Acesso em 22 nov. 2013.

PICANÇO, Aurélio P. **Influência da recirculação de percolado em sistemas de batelada de uma fase e híbrido na digestão da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos.** 2004. 135 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

PINTO, Deíza M. C. L.; BALDOCHI, Viviana M. Z.; POVINELLI, Jurandyr. Procedimento para elaboração de resíduo sólido urbano doméstico padrão. **Engenharia Sanitária e Ambiental.** Vol. 5, n. 1, p. 25-31, abr/jun 2000.

PROSAB. **Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento de biogás.** 1 ed. Rio de Janeiro: ABES, RiMa, 2003.

PROSAB. **Estudos de caracterização e tratabilidade de lixiviados de aterros sanitários para as condições brasileiras.** Luciana Paulo Gomes (coordenadora). Rio de Janeiro: ABES, 2009

REINHART, Debra R; AL-YOUSFI, Basel A. The impact of leachate recirculation on municipal solid waste landfill operating characteristics. **Waste Management & Research.** v. 14, p. 337-346, ago 1996.

RIBEIRO, DANIEL V. A Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Uso Indiscriminado de Resíduos Sólidos pela Sociedade Brasileira. **Conexão Academia,** Vol. 1, n. 1, p. 25-30, 2011.

SALSA, Noelle S. **Caracterização física dos resíduos sólidos domiciliares em diferentes formas de habitação.** 2013. 95 f. Monografia (Graduado em Engenharia Ambiental). Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Londrina, Londrina, 2013.

SAN, Irem; ONAY, Turgut T. Impact of various leachate recirculation regimes on municipal solid waste degradation. **Journal of Hazardous Materials.** v. 87, p. 259-271, out 2001.

SANPHOTI, N. et al. The effects of leachate recirculation with supplemental water addition on methane production and waste decomposition in a simulated tropical landfill. **Journal of Environmental Management**. Vol. 81, p. 27-35, out 2006.

SANTOS, Valter C. dos. **Projeto, construção e instrumentação de um lisímetro em escala de laboratório para estudos em resíduos sólidos**. 2010. 105 f. Monografia (Graduado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2010

SEMA/IAP. Resolução conjunta nº 01, de 15 de Outubro de 2004. Os Aterros Sanitários deverão ser submetidos ao processo de Licenciamento Ambiental.

Disponível em:

<[http://celepar7.pr.gov.br/sia/atosnormativos/form\\_cons\\_ato1.asp?Codigo=1463](http://celepar7.pr.gov.br/sia/atosnormativos/form_cons_ato1.asp?Codigo=1463)>.

Acesso em: 05 de out. de 2013.

SILVA, Tiago N.; CAMPOS, Lucila M. de S. Avaliação da produção e qualidade do gás de aterro para energia no aterro sanitário dos Bandeirantes - SP. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. Vol. 13, n. 1, p. 88-96, jan/mar 2008.

SILVA, Tiago N.; FREITAS, Fernando S. N.; CANDIANI, Giovano. Avaliação das emissões superficiais do gás de aterros sanitários de grande porte. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. Vol. 18, n. 2, p. 95-104, abr/jun 2013.

SOUTO, Gabriel D. B. **Efeito da variação gradual da taxa de recirculação do lixiviado em reatores anaeróbios híbridos na digestão da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos**. 2005. 91 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil – Área: Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

SOTTI, Gustavo de. **Biogás de digestão anaeróbia dos resíduos orgânicos de restaurante universitário com efluente sanitário**. 2014. 59 f. Monografia (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2014.

SPONZA, Delia T.; AGDAG Osman N. Impact of leachate recirculation and recirculation volume on stabilization of municipal solid wastes in simulated anaerobic bioreactors. **Process Biochemistry**, Vol. 19, n. 12, p. 2157–2165, 2004.

TAVARES, Arilma O. C.; ROSA, Edson V. C. Resíduos Sólidos: Uma discussão sobre a NBR – 10004:2004. **Meio Ambiente Industrial**. p. 74-81, jan/fev 2012.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análises de solo, plantas e outros materiais.** 2 Ed. Porto Alegre: Departamento de solos UFRGS . 1995, 175p.

TCHOBANOGLOUS, George; KREITH, Frank. **Handbook of solid waste management.** 2 ed. New York: McGraw-Hill, 2002.