

1 Introdução

1.1 Descrição do problema

Desde os primórdios das civilizações humanas toda atividade desenvolvida por sua ação gera um resto e/ou dejetos. Contudo, existe uma distinção entre eles, que somente a partir da segunda metade do século XIX passou a ser discriminada. Sendo os restos, que normalmente são chamados de lixo, estes resultantes da atividade humana, que são os resíduos sólidos, e os dejetos que são os produtos de nosso metabolismo, tais como: fezes, urina, etc.

Há relatos que, desde a pré-história, já se queimava lixo e se segregavam cinzas e ossos em locais pré-determinados e que, assim como os animais, o homem já traz consigo, no seu instinto, o hábito de afastar dejetos e lixo (Eigenheer, 2009).

O termo lixo foi utilizado inicialmente no lugar do termo técnico “resíduos sólidos”. A palavra lixo vem de *lix*, do latim, que significa cinzas. O significado da mesma palavra na língua portuguesa é coisa imprestável, enquanto que o termo “resíduos sólidos” refere-se a componentes agregados que podem ser separados, reciclados ou reaproveitados, com um potencial econômico agregado (Mancini, 1999; citado por Tavares, 2008).

O problema com a deposição de lixo se deu após o homem deixar de ser nômade e passar a se fixar em aldeias, que começaram a ser formadas por volta de 4 mil a.C. (Eigenheer, 2009).

O lixo passou a ser considerado como algo desagradável não apenas por suas características visuais como também olfativas. Assim, durante o curso da história, os serviços de limpeza urbana, tais como remoção de lixo, dejetos e cadáveres, passaram a serem realizados por grupos sociais denominados

“inferiores”, ou seja, os prisioneiros, estrangeiros, escravos, ajudantes de carrascos, prostitutas, mendigos, entre outros.

Isto pode ser claramente observado pelos relatos históricos, descrito por Eigenheer (2009), onde em Roma, no apogeu do Império, com um milhão de habitantes, iniciou-se a construção de um sistema de limpeza urbana. Sendo que a partir do século I a.C. os sistemas de abastecimento de água eram as principais necessidades. No tempo de Julius Frontinus (40 – 103 d.C.), engenheiro militar e administrador das águas, a cidade recebia 700 mil m³ de água, metade deste volume era para fins públicos e a outra metade subdividida em 1/5 para o palácio impérios e o restante para as casas. A cobrança pela água era feita por seu volume, e o sistema era controlado e vigiado por 700 pessoas. No século IV d.C. Roma possuía ao todo 856 casas de banho gratuitas. Contudo, esta mesma água que adentrava na cidade precisava ser removida e, portanto, a necessidade de captação de águas servidas. A limpeza dos canais destes banhos era realizada por prisioneiros de guerra. Outro fato, é que as casernas de aluguel não estavam ligadas aos canais, que atualmente corresponderia aos sistemas de esgoto, visto que estes sistemas também possuíam tributação. Com isto, os restos eram despejados em fossas que periodicamente pudessem ser esvaziadas a noite e em tempo frio por camponeses ou comerciantes de “adubo”. Já as fezes eram depositadas em tonéis e levadas por escravos para o campo ou cloacas. Dentro disto, ainda existia o fato de alguns moradores pobres e/ou avaros que não podiam ou não utilizavam toaletes públicos, muitas vezes pela noite despejavam seus dejetos pelas janelas, que apesar de proibido foi perpetuado em muitas cidades até o século XIX, inclusive no Brasil.

A revolução industrial proporcionou tanto o crescimento populacional das sociedades de consumo como também o desenvolvimento tecnológico, que vem contribuindo para o aumento da quantidade e variedade de resíduos que precisam ser descartados para dar lugar a novos bens de consumo. Com isto um ciclo de produção foi formando e, cada vez mais, este ciclo promove um maior desgaste e agressão ao meio ambiente, pois estas áreas condenadas a receber toneladas de resíduos podem ser responsáveis pela degradação ambiental das regiões sob sua influência, ocasionando riscos à saúde humana e, no futuro, estarem comprometidas.

Na cidade do Rio de Janeiro, os relatos descritos na obra *Memórias da Rua do Ouvidor*, de Joaquim Manuel de Macedo, os escravos eram os responsáveis por transportar as imundices em barris de madeira (Eigenheer, 2009)

A repugnante tarefa de carregar lixo e os dejetos da casa para as praças e praias era geralmente destinada ao único escravo da família ou ao de menor status ou valor. Todas as noites, depois das dez horas, os escravos conhecidos popularmente como “tigres” levavam tubos ou barris de excremento e lixo sobre a cabeça pelas ruas do Rio. Os prisioneiros realizavam esse serviço para as instituições públicas.

A Figura 1 ilustra como os resíduos eram transportados para seu descarte, na Cidade do Rio de Janeiro, em meados dos anos de 1800. Observa-se que ainda não havia diferença entre o que era resíduo sólido urbano e o que era dejetos (ou seja, restos metabólicos).



TIGRES OU CABUNGOS, RIO DE JANEIRO



J.C. GUILHOBEL, 1814.

Figura 1.1– Descarte de lixo feita por “Tigres”. Fonte: Eigenheer (2009)

Com todos os avanço que foram ocorrendo na história da humanidade, a cidade do Rio de Janeiro passou por alguns fatos marcantes quanto aos sistemas de limpeza pública entre eles, em 1864, com a implantação do sistema de esgoto pela companhia inglesa *The Rio de Janeiro City Improvements Company Limited*; em 1876 foi contratada a empresa de Aleixo Gary para a limpeza urbana; em 1901 foi criada a Superintendência de Limpeza Urbana; em 1975 foi criada a Companhia de Limpeza Urbana (COMLURB). Os resíduos eram assim destinados, de acordo com esses sistemas existentes. Um exemplo é a Ilha de Sapucaia, utilizada desde 1865 a 1949, onde foram vazados cerca de 560 toneladas de lixo. Após esse período, o lixo passou a ser colocado nos aterros do

Retiro Saudoso (Caju), da Penha, do Amorim e de Cavalcanti (Marechal Hermes), onde, nesta época a produção de lixo era de 1.100 toneladas de lixo por dia.

Com o passar dos anos, recentemente na história do Brasil, o destino do resíduo sólido passou a ser feito de diferentes formas, entre elas estão: vazadouro a céu aberto; vazadouro em áreas alagadas; aterro controlado; aterro sanitário; aterro de resíduos especiais; usina de compostagem; usina de reciclagem; e incineração (Pesquisa Nacional de Saneamento Básico de 2000 (IBGE, 2002), citado por Sisino, 2002).

Da década de 1940 até 1980 o volume de lixo produzido se multiplicou, passando a ser aproximadamente 5.000 toneladas por dia, o que correspondia a uma quantidade gerada por uma população de 6 milhões de habitantes. Nessa ocasião, encontravam-se em estágio inicial das atividade em Jardim Gramacho, Bangu, Santa Cruz e Jacarepaguá. Especificamente o depósito localizado em Jardim Gramacho, no Município de Duque de Caxias, as margens da Baía de Guanabara, foi operado de 1978 a 1995 como um lixão a céu aberto. Somente em 1995, passou a ser operado de forma sanitária e medidas de recuperação foram iniciadas. Estima-se que entre setembro de 1978 à junho de 1999 foi depositado cerca de 34.500.000 toneladas de lixo, numa área de 1,3 milhões de m² (Silveira, 2004).

Diante de inúmeras questões, tanto como aumento da produção de resíduos quanto riscos à saúde humana e degradação ambiental, a maioria das prefeituras do Estado do Rio de Janeiro enfrentam problemas relacionados com a gestão dos resíduos urbanos. Algumas das áreas de disposição no Estado do Rio de Janeiro já estão saturadas ou em vias de saturação, como o aterro controlado de Santa Cruz, Itaguaí, Bangu e o de Gramacho.

Sobretudo, a estes fatos, em meados do século XX tornou-se evidente que a ação humana estava influenciando o aumento significativo da produção de gases do “efeito estufa” e assim, promovendo o “aquecimento global”.

A ONU (Organização das Nações Unidas) estabeleceu em 1992 a “Cúpula da Terra” que criou a Conferência Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC) como o primeiro passo no combate ao problema que se anunciava. Em 1998, a Organização Meteorológica Mundial (OMM) e o Programa Ambiental das Nações Unidas (UNEP) criaram o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) para fornecer uma fonte

objetiva de informações científica. Já em 1997 o Protocolo de Kyoto estabeleceu metas de redução de emissões para os países industrializados em que deveriam ser cumpridas até 2012. Alguns acordos foram firmados como o Acordo de Copenhague, em 2009, e o de Cancun, em 2010.

Para que as metas e acordos fossem firmados, o IPCC apresentou 577 trabalhos científicos, que descrevem cerca de 80 mil séries de dados, e destes, resulta que o aquecimento global é inequívoco e que há mais de 90 % de certeza científica de que as alterações no clima são intensificadas pela atividade humana. Com isto, verificou-se a partir de modelagens que as forças antrópicas são um fator dominante entre os anos de 1970 a 2000, como pode ser observado na Figura 2.

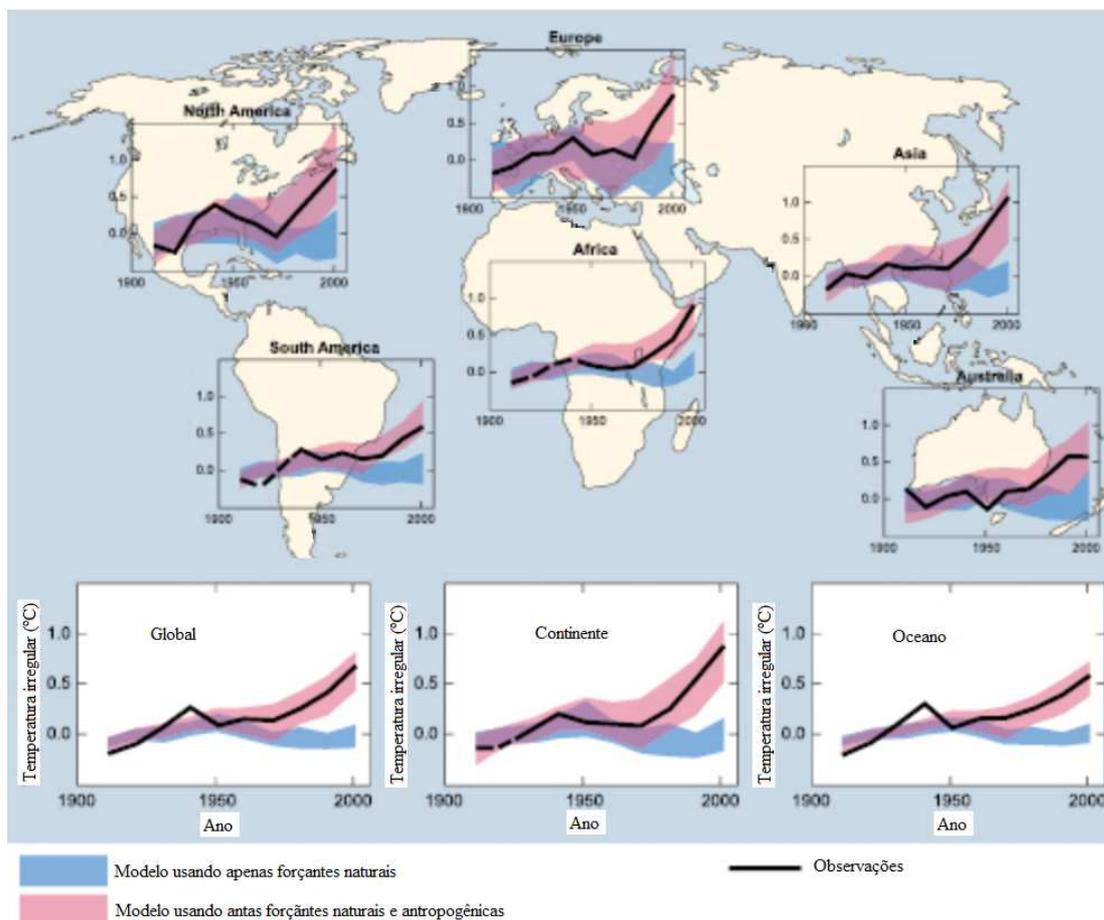


Figura 1.2 – Ações antrópicas e as alterações climáticas. Fonte: Silva & Paula (2009).

Diante deste cenário, o Brasil, como país signatário da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, comprometeu-se a elaborar e atualizar periodicamente o Inventário Nacional de Emissões e Remoções

Antrópicas de Gases de Efeito Estufa não Controlados pelo Protocolo de Montreal. Além disso, o País vem contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa e, para que os acordos possam ser alcançados, em 2009, foi criada a Lei nº12.187/2009 conhecida como Política Nacional sobre Mudança do Clima.

No âmbito da mitigação dos gases de efeito estufa foram definidos, dentro do Plano Nacional sobre Mudança do Clima, setores, entre eles estão os de energia; transportes; edificações; indústria; agrícola; silvicultura/florestas; e resíduos. Em relação a este último setor, um marco foi à implantação da Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei 12.305/2010, assim os resíduos passaram a não mais serem dispostos em locais inapropriados passando a locais apropriados e estabelece um prazo de até o presente ano, de 2014, a extinção de lixões no território nacional. Além desta ação, prevê também a compostagem, reciclagem e a recuperação do gás metano.

Ainda que o lixo e dejetos possam ter sido considerados desprezíveis por grande parte da sociedade existe um paradoxo quanto a seu destino, ou seja, sendo rejeitado ou reutilizado. A forma de reintroduzir o lixo a outra forma de produção vem sendo utilizada, também, desde os primórdios. Há menção do uso do resto orgânico na agricultura para a fertilização de solos na Antiguidade, como também na mitologia grega que Hércules solucionou o problema das fezes acumuladas nas estrebarias do rei Augias e usou-as para fertilizar os campos. Novas formas de reaproveitamento do resíduo vêm sendo utilizadas. Não apenas pelo emprego do material orgânico putrescível na adubação de solo, mas, também, a reutilização dos demais materiais, como: plásticos; metal; vidro; papel; entulho; entre outros. Há ainda o reaproveitamento do material, não pelo ingresso na uma linha de produção, mas através da captação de energia proveniente de sua destruição ou decomposição.

O biogás produzido pela digestão anaeróbica (*AD – Anaerobic digestion*), um dos fatores do aquecimento global, pode ser utilizado como uma das fontes alternativas de energia limpa, reduzindo os impactos ambientais, pois provêm de fontes renováveis, tais como fração orgânica do RSU e resíduos da agroindústria.

Há relatos de que a Inglaterra, em 1895, foi à pioneira na utilização do potencial energético do biogás, pela digestão anaeróbia do material orgânico, para

a geração de energia elétrica nas luminárias da Rua Exter em Londres (Rocha, 2006, citado por de Melo, 2010).

Países como a Índia e China deram início ao processo de geração de biogás em biodigestores com o uso de esterco de animais, a partir do início do século XX (Pecora, 2006, citado por de Melo, 2010).

Embora as fontes de energia alternativa sejam de conhecimento da humanidade por alguns séculos, a sua introdução e crescente preocupação em desenvolver processos mais eficientes, se dão geralmente em crises, tais como a crise mundial do petróleo em 1973. Nesta época o Brasil começou a investir em energias alternativas, inicialmente com o uso do álcool. Mais tarde com o uso de energia eólica, solar, centrais hidroelétricas, biocombustíveis e biomassa. Todavia, com o fim da crise, pouco se avançou sobre estas fontes alternativas e foi como se os ânimos tivessem sido apaziguados.

Por fim, observando todo o passar dos anos e as preocupações com o nosso planeta em consonância com as políticas assumidas pelo nosso País, nasce também à preocupação em estimar, com maior cautela, a previsão da geração de gases nos locais de deposição de resíduos sólidos. Para que os projetos de aproveitamento energético possam ser aceitos, torna-se necessário alguns dados a fim de realizar uma estimativa do volume de gás que deverá ser produzido, com o uso dos modelos matemáticos.

O Brasil é o país que tem o maior número de projetos de aproveitamento de biogás em aterros sanitários registrados na Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Alterações Climáticas, com um número de 17. O segundo é o Chile com 6 projetos. Seguido pela Argentina e China com 5, México com 3, África do Sul, Coreia do Sul e Tunísia com 2, Armênia, Bangladesh, Bolívia, Costa Rica, Egito, El Salvador, Equador, Geórgia, Israel, Malásia, Peru e Tanzânia com 1 (Azevedo & Landim, 2008).

Os projetos submetidos à ONU, para o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (CDM – *Clear Development Mechanism*), devem seguir um procedimento para o cálculo das emissões de metano a partir de RSU, onde a quantidade de metano gerada a partir da disposição de RSU é calculada com base num modelo de decaimento de primeira ordem. Nos casos em que o metano é capturado ou queimado, evitando as emissões de metano para a atmosfera, as emissões são ajustadas para uma fração de metano capturado. Este modelo considera os

parâmetros *default* do modelo IPCC que, de forma genérica, considera os tipos de resíduos presentes na massa.

Existem inúmeros modelos de previsão de geração de biogás disponíveis. Além do IPCC, existem muitos outros que também consideram um modelo de decaimento de primeira ordem da matéria orgânica, onde suas diferenças estão relacionadas com as constantes que cada um deles leva em consideração. Mas, por existir uma alta complexidade envolvendo o material disposto num aterro, torna-se difícil compreender suas inúmeras variáveis envolvidas e como estas podem estar interconectadas.

Como no desenvolvimento desses modelos, inicialmente, seus parâmetros foram obtidos através de ajuste as séries históricas de medições de gases, diversas pesquisas foram e ainda têm sido realizadas com o intuito de avaliar o potencial de geração de gases ou mesmo de obter desses parâmetros. Assim, estudos aplicando tecnologias na digestão anaeróbica estão em desenvolvimento, considerando não apenas as questões energéticas como também o benefício ao meio ambiente.

Dados obtidos a partir de ensaios de digestão anaeróbica em laboratório, podem determinar o potencial final de biogás (*ultimate biogas potencial*) ou potencial bioquímico de metano e, são utilizados como parâmetro nos modelos matemáticos. São assim, material chave para avaliar as questões envolvidas tanto em projetos, manejo e aspectos econômicos da implementação em larga escala do aproveitamento energético.

Existem inúmeros equipamentos tanto em pequena quanto em larga escala para determinar o potencial bioquímico de metano (que serão apresentados no seguinte capítulo). Alguns com diferenças nos tipos de medições e outros com pequenas modificações em relação à montagem do ensaio. Estas variações são decorrentes da não existência de uma norma padronizada de determinação desse parâmetro, embora alguns países tenham uma normativa para sua realização, sendo que muitas vezes está relacionada à bio-estabilização do resíduo após um processo de pré-tratamento (como exemplo: para tratamentos mecânicos-biológicos).

Há registros, na literatura, de inúmeros dados de potencial de biogás e/ou bio-estabilização de diversos tipos de resíduos sólidos, sendo que dentro do RSU ainda existem dados que são apresentados em termos de uma massa única ou

mesmo por componentes dos seus constituintes. A comparação dos dados é muito difícil, não apenas pela heterogeneidade do material sólido, mas, também, pela falta de padronização dos equipamentos, das condições a qual os ensaios são realizados ou mesmo na forma de apresentação dos resultados, pois muitas vezes pode ser dado em termos de volume ou volume por massa, ou volume por teor de matéria orgânica ou ainda por teor de sólidos voláteis.

No Brasil, o Aterro de Bandeirantes, no município de São Paulo, inaugurado em 1982, é um exemplo do aproveitando a energia do biogás gerado pela degradação dos RSU aterrados. No ano de 2004, a Biogás Energia Ambiental S.A e a prefeitura do estado de São Paulo assinaram um contrato para a exploração do gás, originando a Usina Termelétrica Bandeirantes, que gerariam 20 MW. Após 25 anos de operação, o aterro foi desativado em 2007, em que houve a deposição de 30 milhões de toneladas de resíduos. Nos três anos de funcionamento da termelétrica, foi possível abastecer uma cidade de aproximadamente 25 mil habitantes, evitando a liberação para a atmosfera de 1,6 milhão de toneladas de carbono.

No Estado do Rio de Janeiro, em 2003 foi iniciado a Central de Tratamento de Resíduos (CTR) Nova Iguaçu. Esta criou o projeto Novagerar, com o objetivo de captar, tratar e aproveitar a energia do biogás para a produção de energia limpa. O Novagerar foi o primeiro empreendimento do mundo a ser oficialmente inscrito como projeto de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) do Tratado de Quioto (Azevedo & Landim, 2008).

Para um maior aproveitamento dos gases, a construção do aterro deve estar vinculado com o sistema de captação e aproveitamento energético, como o caso do CTR Nova Iguaçu. Contudo, é possível o aproveitamento quando o aterro esta em operação (Aterro Bandeirantes) ou mesmo após seu encerramento (Aterro Metropolitano de Jardim Gramacho). Mas, ainda sim, é possível o aproveitamento desses gases em locais como lixões e vazadouros abandonados ou desativados. Para tanto, é importante avaliar a potencial de geração desses resíduos antigos. Nessa seara, há poucos na literatura sobre potencial bioquímico de resíduos de diferentes idades, mas não há estudos sobre a relação entre a produção de biogás num perfil, ou seja, como pode ocorrer a dinâmica de degradação do resíduo e geração de biogás.

1.2 Objetivos

No contexto apresentado, ainda pouco se conhecem sobre resíduos sólidos urbanos antigos. Assim, essa pesquisa visa estudar as características de resíduos urbanos dispostos num aterro metropolitano que existe há mais de 10 anos e é operado de forma sanitária, tendo sido anteriormente um lixão a céu aberto. Para isso foram analisados parâmetros físico-químicos e o potencial de produção de biogás do perfil de deposição de RSU, que permite avaliar a diferença dos inúmeros dados obtidos não somente com idades diferentes como também com profundidades distintas.

Assim, essa pesquisa teve os seguintes objetivos:

- Desenvolver metodologia de coleta, amostragem e processamento de resíduos sólidos urbanos dispostos em aterro metropolitano para análises laboratoriais;
- Desenvolver metodologia para estimativa da idade dos resíduos urbanos já dispostos em aterro sanitário;
- Estudar as características físico-químicas de resíduos urbanos de diferentes idades, já dispostos em um aterro metropolitano por diferentes períodos;
- Desenvolver equipamento para determinar o potencial bioquímico de resíduos sólidos urbanos, em laboratório;
- Avaliar o potencial bioquímico de produção de biogás de resíduos de diferentes idades, em laboratório;
- Avaliar a correlação entre os dados obtidos, detectando uma possível ocorrência de parâmetro de mais rápida e fácil determinação do potencial de geração de gás para materiais de diferentes idades;
- Aplicar os dados das análises laboratoriais em modelos matemáticos para previsão de produção de biogás para o Aterro Metropolitano de Jardim Gramacho (AMJG), complementando a proposta do desenvolvimento de um modelo idealizado pelo professor Eduardo Dell'Avanzi (UFPR).

1.3 Organização da Tese

Esse documento descreverá a metodologia utilizada, resultados e discussão para o cumprimento dos objetivos apresentados. Para tanto, 10 capítulos compõem este volume.

O capítulo 1 compreende a introdução com uma abordagem pedagógica histórica incluindo a conceituação, disposição e aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos (RSU) e os objetivos da pesquisa.

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, compreendendo tanto o entendimento sobre o material de estudo, tal como suas características e o grau de heterogeneidade envolvido, métodos e/ou procedimentos para a sua determinação quanto uma revisão sobre os ensaios de digestão anaeróbica para a determinação do potencial bioquímico de metano e sobre os modelos para estimar as emissões/gerações de biogás oriundas dos RSU.

O capítulo 3 envolve descrições sobre a coleta e a amostragem dos resíduos e sua caracterização física e química dos resíduos, bem como as metodologias empregadas para as respectivas determinações.

O capítulo 4 descreve o equipamento Eudiômetro, desenvolvido no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio (LGMA PUC-Rio), para o ensaio da determinação do potencial bioquímico de metano. Nesse, consta ainda a metodologia e os mecanismos de execuções do ensaio de laboratório como também a equação de decaimento utilizada para o ajuste do comportamento não-linear da curva de obtida experimentalmente.

O capítulo 5 descreve a metodologia desenvolvida para avaliar a idade dos resíduos coletados, através de dados georeferenciados.

No capítulo 6 são apresentados os resultados dos dados da caracterização física e química dos resíduos de diferentes idades e profundidade.

No capítulo 7 consta a apresentação dos dados obtidos pelos ensaios realizados pelo eudiômetro, juntamente com o resumo dos dados obtidos pelo ajuste da equação proposta para descrever o comportamento de decomposição dos resíduos por digestão anaeróbica.

No capítulo 8 apresenta a aplicação de modelos convencionais para a previsão de geração de metano, como também uma abordagem de retro-análise dos parâmetros usados no modelo IPCC aos dados experimentais.

A análise conjunta dos parâmetros obtidos e apresentadas nos capítulos 6 e 7, anteriores, é apresentada no capítulo 9.

Finalizando o estudo foram apresentadas às conclusões no capítulo 10.