

Trabalho de Formatura

Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

VARIAÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA E RELAÇÕES COM A PRODUÇÃO
DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO

Ana Carolina Teixeira Gonzalez

Prof. Dr. César Augusto Moreira

Rio Claro (SP)

2016

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Câmpus de Rio Claro

Ana Carolina Teixeira Gonsalez

VARIAÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA E RELAÇÕES
COM A PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO

Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

Rio Claro - SP

2016

551 Gonzalez, Ana Carolina Teixeira
G635v Variação da resistividade elétrica e relação com a
 produção de biogás em aterro sanitário / Ana Carolina
 Teixeira Gonzalez. - Rio Claro, 2016
 40 f. : il., figs., gráfs., tabs., fots., mapas

 Trabalho de conclusão de curso (Engenharia ambiental) -
 Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e
 Ciências Exatas

 Orientador: César Augusto Moreira

 1. Geofísica. 2. Metano. 3. Eletroresistividade. I. Título.

ANA CAROLINA TEIXEIRA GONSALEZ

VARIAÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA E RELAÇÕES
COM A PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO

Trabalho de Formatura apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas -
Câmpus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para
obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. César Augusto Moreira (orientador)

Prof. Dr. Antonio Celso de Oliveira Braga

M.^a Livia Portes Innocenti Helene

Rio Claro, 28 de Junho de 2016.

Assinatura do(a) aluno(a)

assinatura do(a) orientador(a)

AGRADECIMENTOS

Dedico esse trabalho aos meus queridos e amados pais, Ana Maria Teixeira Gonzalez e Claudio Roberto Gonzalez que primeiramente me possibilitaram a vida e desde então me deram muito amor, e me ensinaram valores essenciais para a minha formação pessoal. Esses aprendizados tão importantes influenciaram diretamente na decisão da escolha do meu curso de graduação que tanto me agregou. Obrigada por sempre apoiarem minhas decisões, por estimularem meu crescimento e acreditarem em mim. São pessoas incríveis e tenho muito orgulho de tê-los como pais. Minha caminhada tem muito de vocês.

Aos meus queridos irmãos Beatriz Teixeira Gonzalez e Guilherme Teixeira Gonzalez que são meus eternos companheiros, amigos e cúmplices com quem partilho os mais puros sentimentos. Gratidão pela convivência e parceria em todos os momentos.

A toda minha família pelo incentivo e confiança, em especial aos meus avós Vilma Cipelli Teixeira, Edson Teixeira, Luzia Ivone Signorelli Gonzalez e Oscar Gonzalez por serem os grandes guardiões da família e meus grandes exemplos. Aos meus tios, tias e primos que estão sempre presentes e atentos às minhas conquistas, dificuldades e alegrias.

Agradeço de coração aberto a todos os amigos que fizeram parte dos meus momentos dentro e fora da universidade, principalmente à turma de Engenharia Ambiental 2010, pois partilharam comigo muitas alegrias, aprendizados, ansiedades, festas, debates e boas discussões. Conhecer vocês foi um grande presente e sinto enorme carinho por cada um. Agradeço especialmente minhas grandes amigas Michele Sarubbi, Marília Cucolicchio, Thais Munhoz, Stella Sanches, Debora Negri, Fernanda Esteves e Tatiana Sakagami pelos intensos momentos de troca.

A todos os professores que se dedicaram para a minha formação acadêmica em engenharia ambiental por esses anos de graduação.

Às minhas amigas de república que além da amizade são também a família que formei em Rio Claro e estiveram presentes em todos os meus momentos. Aprendi muito na nossa casa e sou eternamente grata por essa vivência. À Brisa e ao Sheevo que preenchem a casa de alegria e são amigos muito fiéis.

Sou muito grata aos espaços que pude participar dentro da Unesp e que me trouxeram conhecimentos para além da sala de aula, como o Centro Acadêmico da Engenharia Ambiental (CAEA), o time de voleibol feminino, os grupos de extensão

Semente Viva, Oro Ari e Gira-Sol. Foram espaços muito educadores que me possibilitaram muitos aprendizados pessoais e muitas trocas. São grupos que pude sonhar e viver os ideais que acredito com pessoas corajosas, motivadas e alegres. Vocês são incríveis.

Agradeço profundamente ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico -CNPq- pela concessão da bolsa de estudos de graduação sanduíche do programa Ciência sem Fronteiras. O intercâmbio acadêmico foi o melhor momento que vivi até hoje e possibilitou um crescimento pessoal muito grande. Dessa forma quero agradecer a University of Queensland por ter me acolhido e proporcionado tantos momentos de aprendizado. A todas as pessoas que conheci e que me mostraram a riqueza da diversidade das relações humanas. Toda essa experiência não teria sido tão especial se não fosse também pelas amizades verdadeiras que fiz e tive o prazer de dividir casa: Luiza Pegrucci, Marcela Nicolato Genelhu e Solo Remonato Rizzi. Vocês são irmãos que a Austrália me presenteou e não existem palavras para descrever os momentos mágicos que vivemos. Vocês são maravilhosos, Taringa's Family. Sinto profunda gratidão por ter conhecido vocês e de terem feito parte de um dos meus maiores sonhos.

Por fim, agradeço a todos os envolvidos diretamente nesse trabalho, em especial ao meu orientador Prof. Dr. César Augusto Moreira que me ajudou na realização desse estudo e sempre esteve muito presente em todas as etapas do mesmo. Obrigada pela disposição, dedicação e atenção. A todos que auxiliaram na coleta de dados de vazão nos drenos do aterro e aos funcionários do local.

Toda essa vivência foi muito importante para construir meu caminho até o final do curso com a certeza de que aproveitei as melhores oportunidades. Gratidão Unesp-Rio Claro por somar esses episódios dessa minha trajetória.

RESUMO

Os aterros sanitários possuem um grande potencial energético, no entanto o aproveitamento brasileiro dessa fonte de energia ainda é inexpressivo. Uma quantidade expressiva de matéria orgânica é disposta nos aterros sanitários regularmente, a qual serve de matéria prima para a produção de biogás. A degradação anaeróbia da matéria orgânica libera o biogás, constituído basicamente por gás metano (CH_4), gás carbônico (CO_2) e vapor d'água (H_2O). Um dos principais fatores responsáveis pela dificuldade de ordem técnica ao planejamento de coleta deste recurso é a manutenção da taxa produtiva de CH_4 nos aterros sanitários. Estudos geofísicos são ferramentas auxiliares que ajudam na investigação dos materiais em subsuperfície. A geofísica aplicada consiste num conjunto de métodos e técnicas com amplo uso em estudos ambientais. A eletrorresistividade é um dos métodos geofísicos mais utilizados dentro dos estudos ambientais e tem por finalidade facilitar a identificação e caracterização dos materiais presentes no solo (gás, óleo, rocha, etc.). O presente trabalho avalia eventuais relações entre vazão de biogás quantificada em drenos na superfície de uma célula de resíduos em aterro sanitário, com padrões característicos de resistividade elétrica em profundidade. O dreno de maior vazão ($117\text{m}^3/\text{h}$) em profundidade foi caracterizado por valores de resistividade elétrica entre $8000\Omega\cdot\text{m}$ e $100.000\Omega\cdot\text{m}$, em contraste com valores abaixo de $2000\Omega\cdot\text{m}$ que caracterizaram em subsuperfície o dreno de menor vazão ($37\text{m}^3/\text{h}$), além de vazões e resistividade elétrica intermediárias, atribuídos ao predomínio de áreas com acúmulo ou geração de biogás no domínio de captação dos drenos.

Palavras-Chave: biogás; metano; geofísica; eletrorresistividade.

ABSTRACT

Landfills have high energy potential, however the use of this energy source still inexpressive in Brazil. An expressive amount of organic matter is regularly disposed in landfills, which serves as raw material for biogas production. The anaerobic degradation of organic matter releases the biogas, which is basically composed by methane gas (CH₄), carbon dioxide gas (CO₂) and water (H₂O). One of the main factors responsible for technical difficulties on planning the capture of this resource is the CH₄ rate maintenance in landfills. The applied geophysics is a set of methods and techniques widely used in environmental studies. The electrical resistivity is one of the most used geophysics methods and aims to facilitate the identification and characterization of materials on the soil (gas, oil, rock, etc.). This study aims to evaluate eventual relationships between biogas flows quantified in drains localized on the surface of a cell waste landfill, with characteristics patterns of the electrical resistivity in depth. The drain of higher flow (117m³/h) in depth was characterized for electrical resistivity values between 8000Ω.m and 100.000Ω.m, in contrast with values under 2000Ω.m, which characterize in subsurface the drain with less flow (37m³/h), As well as intermediate values of biogas flow and electrical resistivity, attributed to the predominance of areas with accumulation or generation of biogas in the drains catchment area.

Keywords: biogas; methane; geophysics; electrical resistivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Localização do município de Rio Claro.....	13
Figura 2 Aterro sanitário municipal de Rio Claro.....	14
Figura 3 Rotina de operação do aterro.....	16
Figura 4 Fases da degradação da matéria orgânica presente nos resíduos sólidos de aterro sanitário.....	18
Figura 5 Desenho esquemático de um aterro sanitário e seus componentes.....	22
Figura 6 Propagação de campo elétrico em meio tridimensional, por meio de um dispositivo de quatro eletrodos.....	24
Figura 7 Instrumento para análise da concentração do biogás.....	25
Figura 8 Esquema dos arranjos (a) Wenner e (b) Schlumberger.....	25
Figura 9 Esquema do arranjo Wenner-Schlumberger.....	28
Figura 10 Procedimento de fechamento do dreno de gás para medição.....	29
Figura 11 Termo-anemômetro.....	29
Figura 12 Adaptadores para medição da velocidade do biogás.....	29
Figura 13 Localização da área de estudos, com posição das linhas de aquisição de dados e drenos de medida da vazão de biogás.....	30
Figura 14 Cabos usados para o encaminhamento elétrico e aparelho usado para medições de resistividade elétrica.....	31
Figura 15 Modelos de inversão em termos de resistividade, posição dos drenos de biogás na superfície e delimitação de áreas de influencia em profundidade.....	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Características do aterro municipal de Rio Claro- SP.....	14
Tabela 2 Vazão de biogás nos drenos.....	32

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	10
2. OBJETIVOS.....	12
3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	13
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
4.1 Produção de biogás em aterros sanitários.....	17
4.2 Aproveitamento energético do biogás no Brasil.....	21
4.3 Método geofísico da eletrorresistividade.....	23
4.4 Estudos ambientais com a aplicação do método da eletrorresistividade.....	26
5. AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO.....	28
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	32
7. CONCLUSÕES.....	35
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	36
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	37

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A atual crise energética enfrentada pelo Brasil e por outros países alinhados ao crescente interesse na geração de energia limpa e sustentável por meio de recursos renováveis coloca em evidência tecnologias energéticas que geram menores impactos ambientais e que possuam redução das emissões antrópicas de carbono, colaborando para a redução do aquecimento global (IPCC, 1996).

Dentro dessa nova percepção, os aterros sanitários aparecem como importantes objetos de estudo considerando seu potencial de geração de subprodutos energéticos. A degradação da matéria orgânica em aterros gera efluentes, como o chorume e o biogás, sendo esse último passível de ser usado como matéria prima para geração de energia (CETESB/SMA, 2006).

O biogás é uma mistura gasosa majoritariamente composta por metano (CH_4) e gás carbônico (CO_2) proveniente da degradação anaeróbia da matéria orgânica dos resíduos sólidos. É um gás de alto potencial de aproveitamento energético em termos nacionais, considerando que mais da metade do resíduo sólido brasileiro é composto por matéria orgânica (CETESB/SMA, 2006).

Existem várias metodologias internacionais para estimar o volume de produção de biogás em projetos de aproveitamento energético (IPCC, 1996; USEPA, 1996; LAQUIDARA et al., 1986; TCHOBANOGLOUS et al., 1993; OONK E BOOM, 1995). As características climáticas do Brasil (elevada temperatura e precipitação) e a alta quantidade de matéria orgânica e biodegradabilidade dos resíduos domiciliares gerados no país, faz com que a geração de biogás seja mais elevada ao comparar com a geração de biogás dos países de clima frio. Em termos comparativos, no Brasil o processo de geração de biogás é intensificado nos primeiros anos e num curto período de tempo entra em estagnação (CASTRO E BELLO, 2010). Dessa forma, os modelos matemáticos internacionais disponíveis são insatisfatórios para as análises brasileiras, pois não propõem parâmetros indicadores de estágios de degradação de matéria orgânica e de atividade biológica.

A geofísica reúne métodos de investigação indireta capazes de identificar as áreas de acúmulo de gás em subsuperfície. O parâmetro físico da resistividade elétrica é bastante usado em perfilagem de poço, principalmente para detalhamento em campos petrolíferos, pois é capaz de estimar parâmetros litológicos como porosidade, permeabilidade, tipos de rocha, presença de óleo ou gás de acordo com o alto valor de resistividade elétrica obtido em campo (ASQUITH & GIBSON, 1982; ELLIS & SINGER, 2008).

O método da Eletrorresistividade é eficiente para estudos de diagnósticos ambientais. A assinatura geoelétrica característica de contaminantes líquidos enriquecidos em sais provenientes da decomposição de resíduos orgânicos indicam baixos valores de resistividade elétrica. Assim, de acordo com os valores obtidos de resistividade elétrica é possível caracterizar o material no subsolo.

Muitos trabalhos de aplicação do método de eletrorresistividade elétrica em aterros visam a delimitação da pluma de contaminação por vazamento de chorume no solo e na água subterrânea (BORTOLIN, 2009; MONDELLI, 2008)

Alguns trabalhos já desenvolvidos em aterros sanitários puderam correlacionar parâmetros geoquímicos, valores de resistividade elétrica e idade de fechamento das valas permitindo estimar as fases predominantes de degradação da matéria orgânica (GEORGAKI et al., 2008; MOREIRA et al., 2009), que recomendam a eletrorresistividade como uma ferramenta indicada em estudos de emissão de biogás em aterros sanitários, com vantagens significativas em termos de custo e área de cobertura.

Apesar de estudos descreverem o emprego de métodos geofísicos no diagnóstico ambiental de aterros, poucos são os trabalhos que visam determinar relações entre resistividade elétrica e biogás em aterros (GEORGAKI et al., 2008; MOREIRA et al., 2011).

Portanto, esse projeto visa uma análise do potencial de aplicação do método geofísico da eletrorresistividade como ferramenta para caracterização de áreas com acúmulo de biogás, por meio de medidas de resistividade elétrica em arranjo tomográfico 2D, para cruzamento com medidas diretas de vazão de biogás em uma célula de resíduos desativada, no aterro sanitário do município de Rio Claro (SP).

2. OBJETIVOS

O presente projeto tem por objetivos:

- Realizar medidas de vazão de biogás em drenos, no aterro sanitário de Rio Claro (SP).
- Realizar medidas de resistividade elétrica em arranjo tomográfico 2D, por meio do método geofísico da Eletrorresistividade, em áreas de influência dos drenos.
- Elaborar o cruzamento gráfico entre vazão de biogás com valores de resistividade elétrica.
- Analisar eventuais correlações entre os parâmetros de resistividade e vazão de biogás e verificar a eficácia da geofísica no reconhecimento de zonas de acumulação de biogás em aterros.

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O município de Rio Claro está localizado no interior do estado de São Paulo, dista cerca de 180 km a noroeste da capital com posição geográfica $47^{\circ} 33' 39''$ W e $22^{\circ} 24' 39''$ S, possui uma área de 499 km² e população estimada igual a 199.961 (IBGE, 2015). A Figura 1 mostra a localização do município de Rio Claro. O município de Rio Claro está inserido na área de abrangência da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) 5, referente às bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (PCJ).



Figura 1: Localização do município de Rio Claro

Fonte: Google

O clima da região de Rio Claro é considerado tropical com duas estações definidas- Cwa na classificação de Koeppen, isto é, w: seca no inverno, a: temperatura superior a 22°C no mais quente, ou tropical alternadamente seco e úmido, controlado por massas tropicais e equatoriais, que predominam em mais de 50% do ano (MONTEIRO, 1973). A média pluviométrica do município é de 1400mm/ano e possui regime de chuva dividido em período chuvoso, de outubro a março, que corresponde a 80% das precipitações anuais e período de seca de abril a setembro (TROPMAIR, 1992).

O aterro municipal de resíduos sólidos de Rio Claro de coordenadas geográficas $47^{\circ} 34' 73''$ W e $22^{\circ} 27' 72''$ S localiza-se a 8km do centro da cidade e possui área de aproximadamente 98000m² (Figura 2). A principal via de acesso ao aterro é pela rodovia Cornélio Pires (SP-127) que fica situada próximo ao bairro Jardim Novo localizada no alto topográfico separando os corpos d'água do Ribeirão Claro e do Córrego da Servidão pertencentes a bacia do Rio Corumbataí. O nível d'água da região do aterro varia entre 5m e 14m.



Figura 2: Aterro sanitário municipal de Rio Claro
Fonte: Google Earth

O relevo da área é caracterizado por inclinação suave no sentido nordeste. A geologia local é constituída por solos arenosos e areno-argilosos produzidos pela alteração de arenitos e siltitos reunidos na Formação Corumbataí (ZAINÉ, 1994). A hidrogeologia na região de Rio Claro é caracterizada como aquífero livre, com alta transmissividade (superior a $50\text{m}^2/\text{dia}$) e poços com vazão entre $17\text{m}^3/\text{h}$ e $25\text{m}^3/\text{h}$. Um segundo sistema de aquífero, confinado, é representado por litotipos do grupo Tubarão, com profundidades superiores a 200m e vazão entre $20\text{m}^3/\text{h}$ e $37\text{m}^3/\text{h}$. (DAEE, 1981).

O aterro sanitário recebe diariamente resíduos sólidos domiciliares classe II A (ABNT NBR10004/2004) provenientes da coleta regular no município de Rio Claro. A Tabela 1 apresenta as características do aterro. Em julho de 2012 o aterro foi ampliado com a construção de uma nova célula, que está em uso, para comportar o volume crescente de resíduo sólido destinado a essa área.

Tabela 1: Características do aterro municipal de Rio Claro- SP

Características do aterro sanitário municipal de Rio Claro - SP	
Área total ocupada pelo aterro	141.637,68 m ²
Área total destinada aos resíduos	90.000 m ²
Quantidade de resíduos prevista no RAP	100,00 ton./dia
Quantidade de resíduos real recebida	180,21 ton./dia
Ano de inauguração	2001
Previsão de encerramento	2017
Vida útil	16,2 anos

Fonte: RAP aterro municipal Rio Claro (2000)

Os resíduos coletados pelos caminhões são depositados na célula receptora e em seguida são nivelados horizontalmente com o uso de trator de esteira para posterior recobrimento com solo estocado retirado da célula escavada (Figura 3A).

Neste momento, são instalados drenos verticais para captação e dissipação do biogás proveniente da degradação de matéria orgânica. As células do aterro são individuais e possuem dimensões de 200m de comprimento e 50m de largura. Quando a capacidade volumétrica da célula é atingida uma camada de 1m de solo argiloso é usada para recobrimento, com desnível de 2% para permitir a drenagem superficial (Figura 3B). As laterais do patamar superior possuem diques para favorecer o escoamento laminar a fim de evitar perda de solo por erosão lateral (Figura 3C). Os drenos tem a função de permitir a saída do biogás gerado da degradação da matéria orgânica. Eles são construídos verticalmente de forma a transpassar todas as camadas de resíduos, desde o sistema de impermeabilização de base até acima do topo da camada de cobertura. Os drenos para escape do biogás possuem duas camadas, sendo a interna de aço e a externa de concreto (Figura 3D). Em profundidade os drenos de biogás são linhas de tubos perfurados, sobrepostos e envoltos por uma camada de brita (de espessura igual ao diâmetro do tubo utilizado) (Figura 3E) e na superior, isto é, quando finalizado, é envolvido por uma camada de concreto, constituindo uma chaminé. O biogás drenado é regularmente queimado nos drenos para evitar acidentes.

Segundo o Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Domiciliares referentes ao ano de 2014 divulgado pela Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental- CETESB o aterro sanitário de Rio Claro foi considerado “adequado” com nota atribuída pelo Índice de Qualidade de Resíduos (IQR) equivalente a 8,6.



Figura 3: A) Disposição de resíduos em célula ativa. B) Vista parcial de célula estudada. C) Orientação de drenos D) Dreno com queima de biogás



E) Dreno em construção envolvido na camada de brita

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Processos de geração de biogás em aterros

A rotina de um aterro sanitário consiste em receber o resíduo sólido urbano proveniente da coleta regular que posteriormente será destinada para aterramento. A matéria orgânica existente nos resíduos coletados é frequentemente recoberta por camadas sucessivas de resíduos. Quando a capacidade volumétrica total da célula de disposição é atingida, todo esse material recebe uma camada de solo que isola o material do contato atmosférico, algo que proporciona um ambiente favorável para o alojamento de colônias de microrganismos anaeróbicos.

A partir desse momento, reações biogeoquímicas são iniciadas promovendo a degradação da matéria orgânica. Em camadas mais superficiais, onde o oxigênio ainda pode estar presente, os compostos orgânicos são oxidados em processos aeróbicos, com geração de gás carbônico (CO_2) e vapor de água (H_2O). Em camadas mais profundas, onde há ausência do oxigênio os compostos orgânicos sofrem digestão anaeróbica gerando dois subprodutos gasosos principais: o metano e o dióxido de carbono (MASSEY & POHLAND, 1978).

O entendimento do processo de geração do biogás, seus fatores e limitantes possibilita considerações importantes para o desenvolvimento de estudos e projetos que visam o aproveitamento energético do mesmo. Neste contexto, é válido enfatizar que o Brasil possui na maior parte de seu território condições climáticas favoráveis, elevada umidade e temperatura para a produção de biogás (LEITE, 2005).

Existem cinco fases de degradação da matéria orgânica em aterros sanitários (POHLAND & GOULD, 1986; TCHOBANOGLOUS, 1993)

- **Fase I-** Ajuste Inicial: ocorre a deposição dos resíduos sólidos no aterro. A decomposição biológica da matéria orgânica é iniciada principalmente em condições aeróbicas devido ao aporte de oxigênio presente no solo usado para o recobrimento dos resíduos. O solo de recobrimento é o principal fornecedor de microrganismos para a decomposição aeróbica e anaeróbica nessa fase.
- **Fase II-** Transição: a presença de oxigênio nessa fase é escassa o que faz com que a digestão da matéria orgânica comece a ocorrer de forma anaeróbia. Os nitratos e sulfatos passam a ser os receptores primários de elétrons nas reações biológicas de conversão no

lugar do oxigênio. A queda do potencial de óxido redução faz com que os microrganismos convertam a matéria orgânica complexa em ácidos orgânicos e outros produtos intermediários.

- **Fase III- Acidificação:** Ocorrem reações de hidrólise e fermentação dos compostos orgânicos mais complexos como lipídios, polissacarídeos, proteínas e ácidos nucleicos. Os produtos dessas reações são convertidos por acidogênese em compostos intermediários de menor massa molecular como o ácido acético (CH_3COOH). O dióxido de carbono é produzido em taxas mais altas. Nessa fase o pH sofre uma queda devido a presença de ácidos orgânicos solúveis no chorume e há liberação e assimilação de nitrogênio e fósforo, além do surgimento de hidrogênio.
- **Fase IV- Metanogênese:** apenas organismos anaeróbios atuam nessa fase, denominados metanogênicos, que são responsáveis pela conversão do ácido acético e do gás hidrogênio em metano e gás carbônico, constituintes básicos do biogás. A taxa de produção dos ácidos é reduzida enquanto a formação do metano sofre um aumento considerável. O pH tende a se tornar mais básico, na faixa de 6,8 a 8,0.
- **Fase V- Maturação:** É a fase final, em que a taxa de geração do biogás já é pouco expressiva devido ao esgotamento do material orgânico passível de biodegradação, ocorrido durante a fase anterior (metanogênese).

A figura 4 mostra com mais detalhes as fases mencionadas acima.

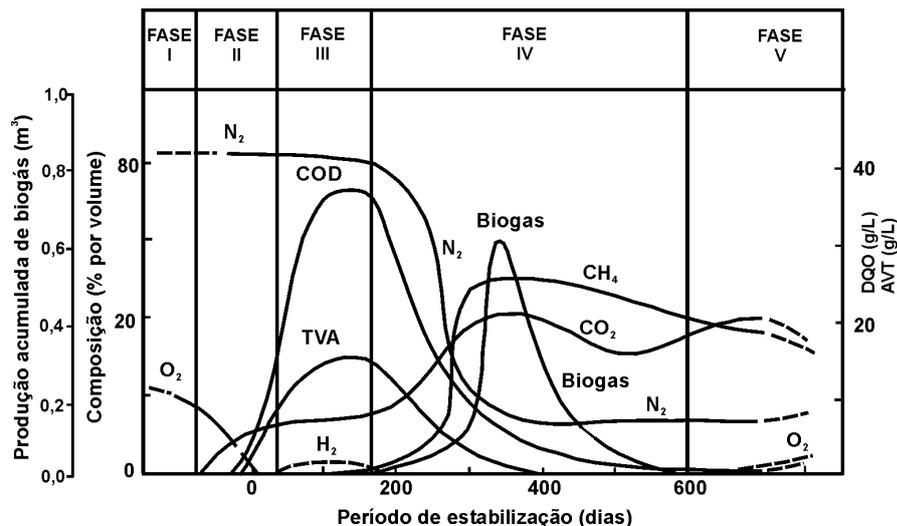


Figura 4: Fases da degradação da matéria orgânica presente nos resíduos sólidos de aterro sanitário

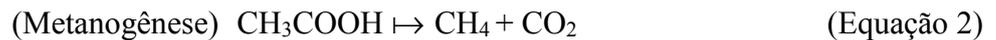
Fonte: Adaptado de POHLAND & GOULD (1986).

O processo de digestão anaeróbia da matéria orgânica por microrganismos é dividida em quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (PELCZAR ,1996; THEMELIS & ULLOA, 2007).

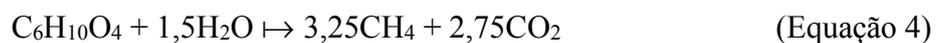
- *Hidrólise enzimática*: processo de hidrólise dos materiais mais complexos em compostos menores por bactérias fermentativas
- *Acidogênese*: os produtos solubilizados da fase anterior são absorvidos por bactérias acidogênicas fermentativas, com formação de substâncias orgânicas mais simples como ácidos graxos voláteis tais como ácido acético, fórmico, propiônico, butírico e láctico, além do etanol e compostos minerais como CO₂, H₂, NH₃ e H₂S.
- *Acetogênese*: bactérias acetogênicas oxidam os produtos gerados na fase acidogênica em substratos apropriados para as bactérias metanogênicas. O etanol e os ácidos graxos são transformados em hidrogênio. Dióxido de carbono e o acetato são produtos da fase acetogênica (Equação 1).



- *Metanogênese*: As metanobactérias convertem o ácido acético, hidrogênio/dióxido de carbono, ácido fórmico, metanol, metilaminas e monóxido de carbono em metano e dióxido de carbono. As metanogênicas são divididas em dois grupos principais, um que forma metano a partir de ácido acético ou metanol (metanogênicas acetoclásticas), e outro que produz metano a partir de hidrogênio e dióxido de carbono (metanogênicas hidrogenotróficas) (Equações 2 e 3). A maior parte do metano gerado nessa fase (70%) é proveniente de reações por bactérias metanogênicas acetoclásticas que reduzem o acetato.



A quantidade máxima de biogás que pode ser produzida por decomposição anaeróbica depende da quantidade de matéria orgânica disponível e pode ser determinada de forma aproximada (Equação 4).



Esta reação exotérmica libera uma pequena quantidade de calor e produz um gás com teores médios de 54% de CH₄ e 46% de CO₂. O biogás gerado em aterros contém também vapor de água próximo do ponto de saturação, além de pequenas quantidades de NH₄, H₂, H₂S e outros constituintes menores.

As reações químicas para geração do biogás são influenciadas por diversos fatores (USEPA, 1996; MENDES, 2005):

- Composição dos resíduos: geração de metano será diretamente influenciada pela quantidade de matéria orgânica no resíduo.
- Concentração de oxigênio: as atividades microbiológicas anaeróbias para geração de metano ocorreram apenas na ausência de oxigênio, condição proporcionada com o recobrimento do material orgânico com solo.
- pH: bactérias metanogênicas possuem atividade ótima em pH neutros, entre 6,8 e 7,2. As fases iniciais do aterro possuem pH mais ácido, que gradam para valores mais neutros apenas na fase final do processo.
- Temperatura: A temperatura ideal para a digestão anaeróbia eficiente é de 29°C a 38°C para as bactérias mesofílicas e entre 49 e 70 ° para as termofílicas. Temperaturas baixas, inferiores a 10°C interferem negativamente na geração de metano. O processo de degradação da matéria orgânica é exotérmico e gera calor suficiente para que ocorra a metanogênese.
- Umidade: garante condições vitais às bactérias, microrganismos responsáveis pela digestão da matéria orgânica e formação do biogás. Umidade alta, cerca de 60% em peso, aumenta a geração do biogás.

As formas de acondicionamento dos resíduos por procedimentos operacionais e o teor de matéria orgânica total dos resíduos possuem aspectos relevantes na geração do biogás em aterros sanitários. O teor de umidade é essencial para o desenvolvimento e metabolismo das bactérias, bem como agente transportador de nutrientes e microrganismos colonizadores. A degradação da matéria orgânica demanda grande quantidade de água para a solubilização e geração de substratos orgânicos e gases. Desta forma, tais fatores aliados as condições hidrológicas e climáticas do local afetam significativamente a velocidade e a taxa de produção de biogás (TCHOBANOGLOUS et al., 1993).

4.2. Aproveitamento energético do biogás no Brasil

Atualmente, existem três formas de disposição final de resíduos sólidos: o lixão, o aterro controlado e o aterro sanitário (PAVAN, 2010). Os lixões são caracterizados pela simples descarga de resíduos, onde não existe nenhuma técnica de prevenção de contaminação de solo e água por lixiviado, nem qualquer instalação de estruturas para captação de gases gerados. Essa forma de disposição é inadequada devido à ausência de controle dos tipos de resíduos que são dispostos, bem como a falta de técnicas de remediação de impactos gerados. Apesar de os lixões serem proibidos no Brasil, estes ainda podem ser encontrados em várias regiões.

Segundo a ABNT NBR 8849/1985 aterro controlado é uma técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, que causa menos riscos à saúde pública e à segurança, minimizando os impactos ambientais. Esse método utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos, cobertos com uma camada de material inerte na conclusão de cada jornada de trabalho. Com essa técnica de disposição é produzido, em geral, poluição localizada, não havendo impermeabilização de base (comprometendo a qualidade do solo e das águas subterrâneas), nem sistema de tratamento de percolado (chorume mais água de infiltração) ou de extração e queima controlada dos gases gerados. O aterro controlado é preferível ao lixão, mas apresenta qualidade bastante inferior ao aterro sanitário. Com a Lei 12.305/2010 os aterros controlados ficam proibidos em território nacional.

Segundo a ABNT NBR 8419/1992 o aterro sanitário é local de destinação final correta dos resíduos sólidos. A disposição de resíduos sólidos no solo em aterro é baseada em critérios de engenharia e normas operacionais específicas, que permitem a proteção do meio ambiente e da saúde pública. Os resíduos são dispostos, compactados e cobertos com terra na forma de células diárias. São empregados princípios de engenharia para tratamento e coleta dos líquidos percolados e gases gerados. Para esse sistema deve ser previsto um sistema de drenagem superficial, de drenagem e remoção de percolado, de tratamento do percolado, de impermeabilização do solo e de drenagem de gás. A Figura 5 mostra esquematicamente os componentes de um aterro sanitário.

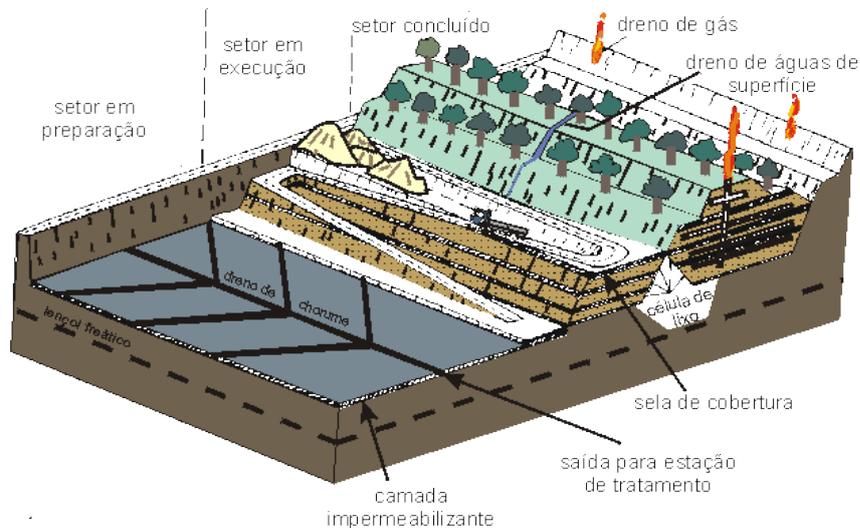


Figura 5: Desenho esquemático de um aterro sanitário e seus componentes.

Fonte: PROIN/CAPES & UNESP/IGCE (1999)

Um aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos pode ser entendido como um grande biorreator, pois a matéria orgânica existente nos resíduos sofre um processo de biodegradação por meio de reações majoritariamente anaeróbicas transformando os compostos orgânicos em biogás, composto principalmente por CO_2 e CH_4 .

O metano produzido em aterros sanitários é um gás combustível com alto poder calorífico, de 14,9 a 20,5 MJ/m^3 , ou aproximadamente 5.800 Kcal/m^3 (MUYLAERT, 2000) e pode ser usado para geração de energia, como gás doméstico, gás combustível industrial ou como gás liquefeito veicular. Empreendimentos de implantação de sistema de captação do biogás de aterro para aproveitamento energético é uma tecnologia bastante estudada e já praticada em muitos países, mas a nível nacional os projetos relacionados a essa área ainda são pouco expressivos.

Em 1977 foi implantado o primeiro projeto de aproveitamento de biogás de aterro em escala industrial no Aterro Caju no Rio de Janeiro. O projeto esteve em operação por 10 anos e em 1980 foi iniciado o aproveitamento do gás para abastecimento da frota da Companhia Municipal de Limpeza Urbana (COMLURB) e de táxis (COMLURB, 2005). O projeto recuperou aproximadamente 10 milhões de metros cúbicos de biogás. Em 1981, a empresa Vega-Sopave e a COMGÁS (Companhia de Gás de São Paulo) distribuía o gás gerado de um aterro localizado na Rodovia Raposo Tavares para um conjunto residencial (DANESE, 1981).

Atualmente, o Brasil possui apenas três aterros sanitários com sistemas de aproveitamento de biogás em operação para geração de energia elétrica e/ou para a obtenção de créditos de carbono (LEITE, 2005; PAVAN, 2010):

- Consórcio Biogás, em Perus, São Paulo. O consórcio construiu a Usina Termelétrica Bandeirantes, responsável pela geração de 22MW de energia.
- Projeto Nova Gerar, em Nova Iguaçu, Rio de Janeiro. Usina termelétrica implantada de 12 MW e negociadora de créditos de carbono no mercado internacional.
- Termoverde, Salvador, Bahia. Terceiro empreendimento desse tipo no Brasil contruída pelo grupo Solví e inaugurada em março de 2011 a termelétrica tem potência de 19,73MW e produzirá 150 mil MWh/ano, suficiente para atender 300 mil residências.

Os estudos de Henriques (2004) e Silva (2006), indicam que o aproveitamento energético do biogás é uma técnica viável e economicamente atrativa no Brasil. Dentre os principais requisitos de projeto para coleta do biogás em aterro para justificar o projeto, é possível destacar: revisão das condições do local e das informações disponíveis, quantidade e composição dos resíduos, o tipo e a configuração do aterro, os dados meteorológicos, as práticas de tratamento do percolado e as taxas em que é gerado (LEITE, 2005).

Dentre as formas de disposição final de resíduos sólidos, é importante destacar que o aproveitamento energético do biogás só pode ser feito em aterros sanitários, uma vez que é necessário que exista uma instalação de sistema de drenagem e captação de biogás.

Dessa forma, o aprimoramento das técnicas desses estudos e a busca por ferramentas alternativas para investigação da geração de biogás, poderão resultar em projetos melhorados quanto à produção de dados para os estudos de viabilidade do aproveitamento energético do biogás.

O presente estudo foi inicialmente planejado para avaliar o uso da geofísica como método de investigação de biogás em aterro sanitário.

4.3. Método geofísico da eletrorresistividade

A geofísica é uma ciência aplicada de investigação indireta que estuda os materiais geológicos sobretudo na prospecção mineral, mapeamento de rochas e estruturas a partir de leituras fornecidas por instrumentos de medição, quanto aos parâmetros físicos intrínsecos do

ambiente, tais como densidade, resistividade, condutância, radioatividade entre outros. Os métodos geofísicos são muito utilizados em estudos ambientais, em pesquisas relacionadas à contaminação de solo e água subterrânea, identificação de aquíferos e à hidrogeologia (MUSSETT & KHAN, 2000).

A Eletrorresistividade é um método geofísico amplamente aplicado em estudos de investigação em subsuperfície. O método consiste na injeção de uma corrente elétrica alternada e com frequência fixa por meio de eletrodos de transmissão que são fixados no terreno, conectados ao instrumento de medição por meio de cabos (TELFORD et al., 2004). A corrente elétrica ao interagir com o solo gera valores de potencial elétrico que são transmitidas para o aparelho de leitura por meio de eletrodos de recepção (Figura 6).

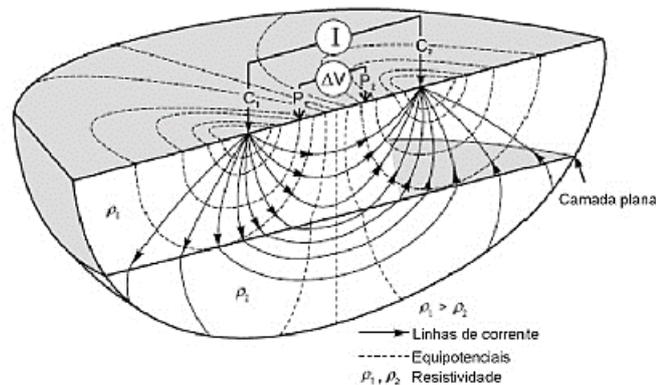


Figura 6: Propagação de campo elétrico em meio tridimensional, por meio de um dispositivo de quatro eletrodos

Fonte: Adaptado de KNÖDEL et al. (2007)

Os dados de amperagem e potencial elétrico obtidos são aplicados na equação da Lei de Ohm para definição da eletrorresistividade do terreno estudado (Equação 5). O espaçamento entre os eletrodos é representado pelo fator K e o parâmetro resistividade aparente (ρ_a) que é definido de acordo com o método de arranjo utilizado (TELFORD, 2004):

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad \Omega.m \quad (\text{Equação 5})$$

O coeficiente K pode ser definido conforme a equação 6:

$$K = 2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \quad (\text{Equação 6})$$

Em que A e B são os eletrodos que emitem a corrente elétrica, e M e N os eletrodos que realizam a leitura dos valores de tensão, que possibilita o cálculo da resistividade.

Para obter o dado de resistividade aparente os arranjos mais usados são Wenner e Schlumberger. O arranjo Wenner separa os eletrodos por uma mesma distância “a” e o deslocamento dos eletrodos deve ser feito simultaneamente para garantir a simetria do arranjo e leitura correta dos dados. O arranjo Schlumberger desloca apenas os eletrodos de corrente, que são afastados dos eletrodos de potencial por uma medida “a” enquanto os de potencial são mantidos fixos por uma distância “b” (GANDOLFO, 2007) (Figura 7)

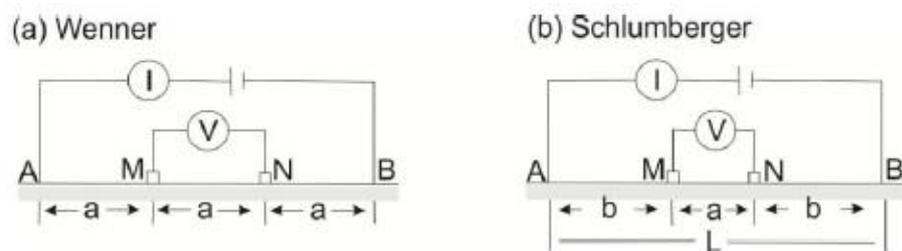


Figura 7: Esquema dos arranjos (a) Wenner e (b) Schlumberger
Fonte: KNÖDEL *et al.* (2007).

O arranjo Wenner-Schlumberger conjuga os dois tipos de arranjo. A diferença na disposição dos eletrodos é que a distância de separação dos eletrodos de corrente em relação aos eletrodos de potencial elétrico é um valor múltiplo de “a”, sendo “a” a distância que separa os eletrodos de potencial elétrico. Dessa forma, no arranjo Wenner-Schlumberger “b” é igual a “na” (GANDOLFO, 2007) (Figura 8).

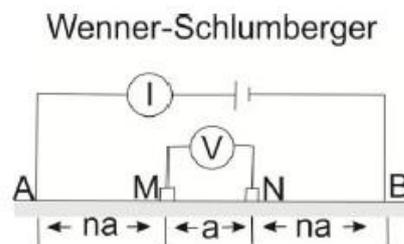


Figura 8: Esquema do arranjo Wenner-Schlumberger
Fonte: KNÖDEL *et al.* (2007).

A escolha desse arranjo é apropriada, pois permite uma maior profundidade de investigação e por isso oferece benefícios para estudos em que se deseja caracterizar mais camadas subsuperficiais, além de ser mais eficaz na redução de ruídos nas leituras (MUSSETT & KHAN, 2000).

O arranjo Wenner-Schumberger pode ser usado na técnica do caminhamento elétrico, que consiste na investigação lateral onde se estuda horizontalmente a variação do parâmetro resistividade e, quando mais de um nível, também verticalmente. Os eletrodos são dispostos em linha e, uma vez posicionados, permitem que o arranjo escolhido “caminhe” sobre eles a fim de efetuar a aquisição de medidas para posterior processamento dos dados em programas de imageamento elétrico de inversão 2D. O “imageamento elétrico” deve ser entendido como o produto final da interpretação quantitativa dos dados obtidos em um caminhamento. Ou seja, a interpretação não deve estar baseada apenas nas pseudo-seções e sim em imagens geradas do processamento dos dados pelas chamadas “técnicas de inversão” (GANDOLFO,2004).

4.4 Aplicação do método da eletrorresistividade em estudos ambientais

O método geofísico da eletrorresistividade é bastante aplicado nos estudos ambientais em aterros sanitários principalmente para detecção de área contaminadas pela percolação de chorume. No entanto, são escassos os trabalhos que procuram determinar relações entre resistividade elétrica e processos biológicos e físico químicos e suas relações com a produção de chorume e biogás em aterros (GEORGAKI et al., 2008; MOREIRA et al., 2011). A eletrorresistividade é aplicada nos estudos ambientais e alguns trabalhos relacionados a essa temática estão mencionados a seguir.

O estudo de Moreira, Braga & Fries (2009) usou a eletrorresistividade como ferramenta de investigação no aterro sanitário de Cordeirópolis-SP pelo período de 2004 a 2007. O trabalho relacionou valores eletrorresistivos com a produção de chorume provindos do consumo da matéria orgânica. A aplicação do método resultou em leituras de baixa resistividade indicando zonas com alto nível de sais dissolvidos devido ao contínuo processo de degradação de matéria orgânica existente na área estudada do aterro.

Os autores Costa Silva, Malagutti Filho & Moreira (2009) investigaram possíveis plumas de contaminação subterrânea por necrochorume no cemitério municipal de Vila Rezende, no município de Piracicaba-SP. As áreas contaminadas por necrochorume foram as de baixo valor eletrorresistivo e o estudo sugeriu meios para controlar a contaminação.

O trabalho de Mondelli (2008) investigou a pluma de contaminação de lixiviado no aterro sanitário de Bauru-SP. Foram usados vários métodos geofísicos para o estudo da área e entre eles o da eletrorresistividade. Os ensaios facilitaram a visualização da dimensão espacial e a identificação dos sentidos das plumas de contaminação existentes na área, que foram confirmadas após a realização dos ensaios de resistividade em laboratório e em campo.

Em Georgaki et al. (2008) é proposto à avaliação de medidas de resistividade elétrica para estimativa das taxas de emissão de CH₄ e CO₂ no aterro sanitário de Pera Galini (Grécia), por meio da técnica de encaminhamento elétrico, em áreas com diversos graus de emissão gasosa quantificadas no estudo. Os resultados mostraram áreas com graus variáveis de fluxo por meio de padrões de resistividade elétrica possibilitando a estimação do potencial de produção de biogás a partir de uma quantidade significativamente reduzida de medidas pontuais de emissão gasosa.

Os trabalhos mencionados acima mostram a eficácia do uso dos métodos geofísicos nos estudos ambientais e qualifica a aplicação do método da eletrorresistividade nesses estudos.

5. AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO

Para o desenvolvimento da análise desse estudo foi necessário a aquisição dos dados de vazão de biogás nos drenos e dos dados geofísicos de eletrorresistividade. Os dados de vazão de biogás foram obtidos de acordo com a técnica apresentada no trabalho de Antonio (2012). Dessa forma, os procedimentos de medidas, equipamentos e acessórios utilizados seguem a metodologia da autora. Os dados de vazão foram coletados no mês de maio/2013, referente a estação seca do ano. As medidas de produção e composição de biogás foram realizadas a partir do medidor desenvolvido pela Landtec, modelo GEM-2000, elaborado para quantificar concentrações de CO₂, CH₄ e O₂ e outros possíveis gases presentes, além de pressão barométrica, pressão relativa e temperatura (Figura 9)



Figura 9: Instrumento para análise da concentração do biogás

Fonte: ANTONIO (2012).

Os drenos do aterro ficam constantemente acesos para a queima do biogás de escape com a finalidade de evitar acidentes de explosividade. Para obtenção das medidas de concentração de gás metano presente no biogás nos drenos foi necessário apagar a chama (Figura 10), resfriar o dreno com um pano molhado (Figura 10B), selar o dreno com filme plástico (Figura 10C) e após 1 hora de estabilização realizar as medições (Figura 10D). Para realizar a medida, o plástico é perfurado e o termômetro é inserido até uma profundidade de 10 cm com espera de um 1 minuto para que ocorra a estabilização do sistema.

A velocidade do biogás nos drenos foi obtida a partir da utilização do termômetro anemômetro digital portátil Texto modelo 405-V1, com precisão de 0,01m/s, no intervalo de medidas entre 0m/s e 10m/s (Figura 11). Como a velocidade do biogás no dreno é inferior a velocidade do vento usou-se adaptadores de chapa galvanizada de diâmetro conhecido para diminuir a interferência do vento (Figura 12). As velocidades do biogás foram medidas a cada 10 segundos, durante 1 minuto, totalizando 6 medidas obtendo-se, assim, a velocidade média do biogás.



Figura 10: Procedimento de fechamento do dreno de gás para medição

Fonte: ANTONIO (2012).



Figura 11: Termo-anemômetro

Fonte: ANTONIO (2012)



Figura 12: Adaptadores para medição da velocidade do biogás

Fonte: ANTONIO (2012)

A vazão do biogás foi calculada pela aplicação da Equação 7

$$Q = V \cdot A$$

Equação 7

Onde: Q = vazão (m^3/s);
 V = velocidade do biogás (m/s)
 A = área (m^3)

A aquisição dos dados geofísicos foi realizada pelo método da eletrorrestividade, por meio do arranjo de eletrodos Wenner-Schlumberger, que utiliza eletrodos fixados na superfície do terreno, conectados ao instrumento de medição por meio de um conjunto de cabos (TELFORD et al., 2004). O período de aquisição de dados geofísicos foi realizada no mês de maio/2013, referente a estação seca do ano.

Foram realizadas 5 linhas de caminhamento elétrico com comprimento individual de 120m e espaçamento de 5m entre eletrodos. A disposição das linhas na área de estudo enfatizou a proximidade de drenos de emissão de biogás, na tentativa de avaliação da resistividade em suas respectivas áreas de influência (Figura 13).



Figura 13: Localização da área de estudos, com posição das linhas de aquisição de dados geofísicos e drenos de medida da vazão de biogás

O aparelho usado para a aquisição dos dados eletrorresistivos foi o resistivímetro Terrameter SAS 4000 (Figura 14) que possibilita leituras de resistividade elétrica por meio de ciclos periódicos de leitura em intervalos de tempo programados.

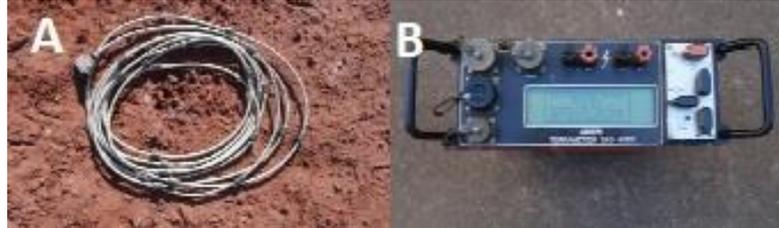


Figura 14: A) Cabos usado para o caminhamento elétrico, B) Aparelho usado para medições de resistividade elétrica.

Fonte: ANTONIO (2012)

As medidas de resistividade elétrica adquiridas em campo, foram processadas no programa Res2dinv (GEOTOMO SOFTWARE, 2004) e resultaram em seções de resistividade em termos de distância x profundidade, com escala gráfica logarítmica e intervalos de interpolação de valores em cores. Este é um programa que determina automaticamente um modelo bidimensional de subsuperfície a partir de dados de resistividade obtidos em ensaios de caminhamento elétrico. O software Res2dinv (GEOTOMO SOFTWARE, 2004) usa um modelo inicial para o processo iterativo dos dados. O modelo é determinado automaticamente, considerando um semi-espaço homogêneo com resistividade constante e igual à média dos logaritmos dos valores das resistividades aparentes (GANDOLFO, 2007).

O modelo 2D utilizado no programa divide a pseudo-seção em blocos retangulares, que representarão a pseudo-seção pelo ajuste das medidas de campo. Esta otimização procura reduzir a diferença entre os valores de resistividade aparente, calculados e medidos em campo, pelo ajuste da resistividade do modelo de blocos, cuja diferença é expressa pelo erro RMS (Root Mean Squared) (LOKE & BARKER, 1996). Os modelos de inversão foram padronizados numa escala única de cores e valores, para que sejam permitidas análises comparativas entre linhas, com cores quentes com maior resistividade e as cores frias com resistividade baixa.

No produto gráfico pós-processado foram posicionados os drenos mais próximos, individualizados com numerações respectivas, aos quais foram demarcadas áreas de influência de 10m de largura de drenagem de biogás em profundidade, para que fosse possível realizar as comparações dos resultados e embasar as discussões dos mesmos.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A vazão de biogás nos drenos foi calculada a partir da Equação 7 citada anteriormente, os resultados foram tabelados e apresentados a seguir (Tabela 2). Os dados possuem uma ampla variação de medidas de biogás. Essa variação das medidas pode ser atribuída à localização dos drenos, pois estão instalados em áreas diferentes quanto a idade de disposição dos resíduos. O volume de geração de biogás será determinado pelo estágio de decomposição da matéria orgânica. Além desse fator, o aterro possui uma complexa dinâmica de produção e fluxo do biogás diretamente relacionado a variação temporal da porosidade.

Tabela 2: Vazão de biogás nos drenos

Dreno	Vazão (m ³ /h)
24	117
25	93
26	99
27	84
28	76
29	37
30	52
31	86

A rotina de disposição dos resíduos no aterro segue as seguintes etapas: lançamento dos resíduos na frente de operação pelos caminhões de coleta, compactação por trator esteira, e cobertura com solo escavado durante a abertura da célula. Com o aumento de patamares superpostos de resíduos há uma maior compressão do material antigo diminuindo assim a porosidade no sistema. Quanto menor a porosidade do terreno, mais difícil será o escape do biogás gerado. Além disso, a porosidade do sistema também diminui conforme o processo de consumo de matéria orgânica, pois os materiais sólidos são transformados em líquidos e gases que ao deixarem o sistema, proporcionam espaço para acomodação de materiais como plásticos e borrachas.

Dessa forma, é esperado que ocorram baixas vazões de biogás em drenos localizados em áreas mais antigas do aterro, pois nessas regiões a disponibilidade de matéria orgânica passível de degradação é reduzida e também devido a fuga de gases presentes por fraturas provocadas no solo pela acomodação dos resíduos, dentre outros fatores.

De maneira geral, é esperado que os dados geofísicos mostrem zonas de alta resistividade elétrica nas áreas de influência dos drenos que possuem maior acúmulo ou vazão de biogás na massa de resíduos, devido à característica isolante do material gasoso. Em contrapartida, os drenos que possuem baixo fluxo de biogás devem indicar medidas de resistividade elétrica

relativamente mais baixas por serem áreas com teores relativamente maiores de umidade e sais dissolvidos devido a degradação da matéria orgânica.

A Figura 15 é o resultado gráfico do cruzamento dos dados de vazão com os valores de resistividade elétrica para cada linha. O espaçamento entre os eletrodos e a quantidade de níveis investigados em profundidade resultam em seções modeladas para a profundidade de aproximadamente 10 metros, intervalo considerado como seco ou insaturado em lixiviado. O raio de influência dos drenos é de 10 metros e a posição dos mesmos está indicada no gráfico.

O gráfico caracteriza zonas predominantemente eletrorresistivas para os drenos de maior vazão e zonas de baixa resistividade nas proximidades de drenos com baixa vazão.

O dreno 24, localizado na linha 3, possui a maior vazão de biogás da área estudada ($117\text{m}^3/\text{h}$). Os valores de resistividade elétrica são altos e variam de $2000\Omega\cdot\text{m}$ a $122000\Omega\cdot\text{m}$ na área de influência do dreno. O dreno 29 possui a menor vazão de biogás ($37\text{m}^3/\text{h}$) e está localizado em uma região de baixa resistividade elétrica, com valores entre $30\Omega\cdot\text{m}$ e $2000\Omega\cdot\text{m}$.

Os drenos que possuem vazões intermediárias apresentam, em posições mais profundas, contraste de valores de resistividade em suas áreas de influência. Essa descrição pode ser visualizada nos drenos 26 ($99\text{m}^3/\text{h}$) e no 31 ($86\text{m}^3/\text{h}$) em que valores de resistividade mais baixo mudam para valores mais altos na direção horizontal. De forma análoga, esse contraste pode ser observado nos drenos 25, 28, 29 e 30, no entanto as mudanças de resistividade acontecem na direção vertical.

Dessa forma, esses casos podem indicar que há ocorrência de zonas de degradação de matéria orgânica e produção de biogás, o que justifica as baixas medidas de resistividade fazendo fronteira com zonas enriquecidas em materiais inertes e com porosidade para acúmulo de biogás justificando as altas medidas de resistividade.

O dreno 24 está localizado em uma área que apresenta alta resistividade (entre $8000\Omega\cdot\text{m}$ e $100.000\Omega\cdot\text{m}$) limitado por duas áreas pequenas com resistividade entre $2000\Omega\cdot\text{m}$ e $8000\Omega\cdot\text{m}$, o que pode representar zonas de acúmulo e produção de biogás respectivamente. Os drenos 25, 26, 28, 30 e 31 transpassam parcialmente áreas de alta resistividade elétrica, ou então, zonas com acúmulos de biogás. O dreno 29 foi representado duas vezes no gráfico por compor duas linhas que se cruzam perpendicularmente, sendo que em ambos os casos, as leituras geofísicas apresentaram baixos valores de resistividade elétrica, entre $9,5\Omega\cdot\text{m}$ e $2000\Omega\cdot\text{m}$ o que sugere ser uma zona com matéria orgânica em decomposição. Os drenos 24 e 29 são os de maior e menor vazão de biogás, respectivamente e estão ligados pela linha 3. A região entre os drenos é

caracterizada como uma área altamente resistiva e possui pequena ligação em profundidade com o dreno 24.

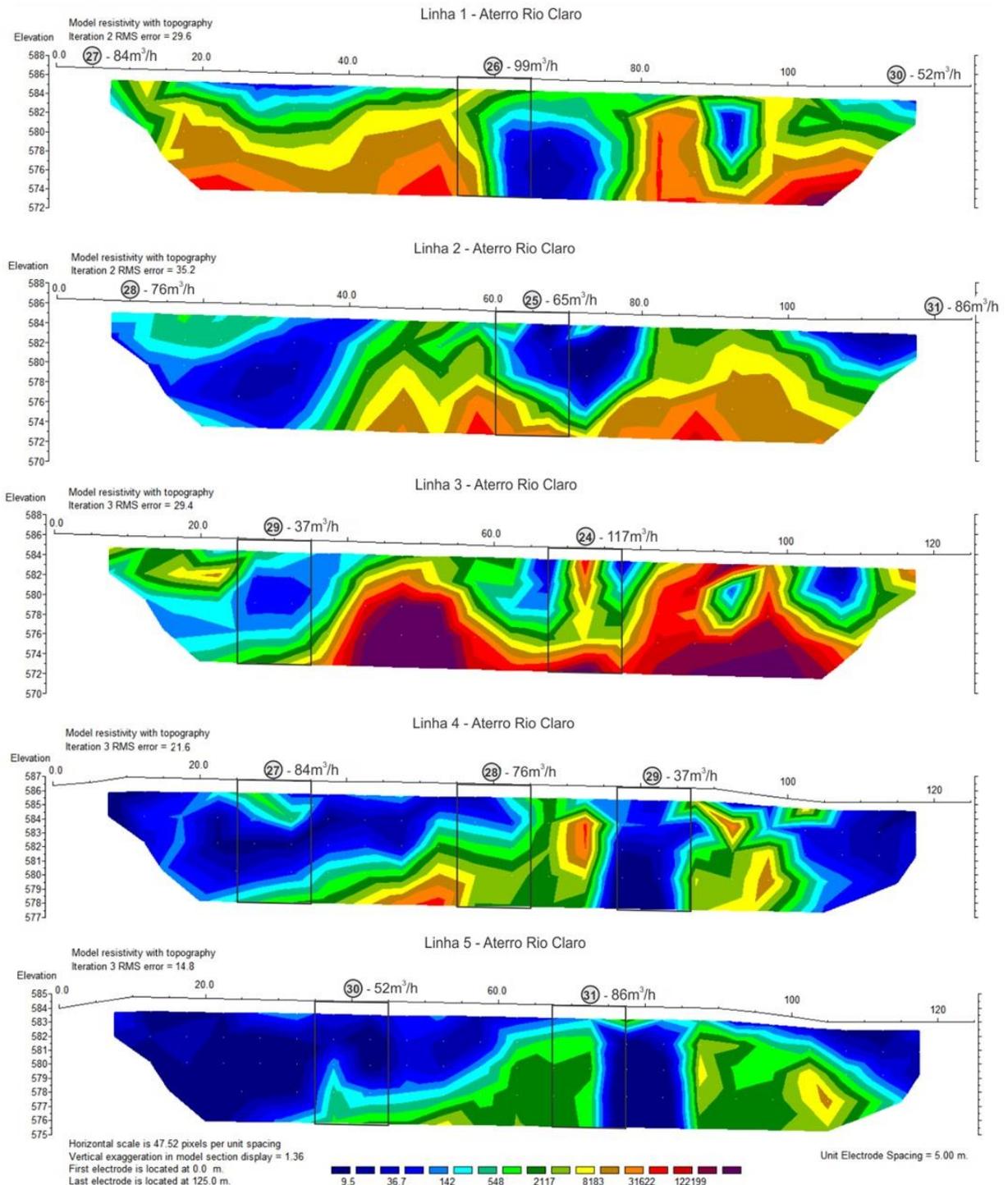


Figura 15: Modelos de inversão em termos de resistividade, posição dos drenos de biogás na superfície e delimitação de áreas de influencia em profundidade.

7. CONCLUSÕES

A decomposição da matéria orgânica em aterro sanitário gera subprodutos como chorume e o biogás. Os principais componentes do biogás de aterro são o CH_4 e CO_2 , sendo que o CH_4 é um gás combustível com alto poder calorífico, de $14,9 \text{ MJ/m}^3$ a $20,5 \text{ MJ/m}^3$, ou aproximadamente 5.800 Kcal/m^3 (MUYLAERT,2000) e pode ser usado para geração de energia. Assim sendo, empreendimentos de implantação de sistema de captação do biogás de aterro para o aproveitamento energético são bastante promissores.

O conhecimento da dinâmica do aterro sanitário, como sua rotina, operação, fases de degradação dos resíduos e subprodutos gerados é essencial para que projetos de aproveitamento energético do biogás sejam elaborados.

Dessa forma, o presente trabalho apresentou dados relevantes para uma análise mais detalhada sobre a produção de biogás em aterro relacionando dados de vazão de biogás nos drenos com medidas geofísicas de resistividade elétrica. As medidas de vazão do biogás nos drenos apresentam uma ampla variação considerando a pequena área de estudo, fato possivelmente justificado pela idade dos resíduos, compactação, pelo perfil construtivo dos drenos, e a conexão entre zonas de acumulação de biogás e área de influência dos drenos.

As investigações geofísicas permitiram análises de medidas de resistividade elétrica para diversos níveis de profundidade ao longo de linhas de drenos. Como o biogás é um isolante elétrico é esperado elevados valores de resistividade elétrica onde haja acúmulo de biogás, enquanto são esperados baixos valores de resistividade elétrica em áreas que possuam geração de biogás com elevada quantidade de matéria orgânica e elevados teores de umidade.

O estudo mostra correspondência direta entre os valores de resistividade elétrica em horizontes de resíduos e vazão de biogás em drenos instalados ao longo de preenchimento de células de resíduos num aterro sanitário. Dessa forma, os resultados sugerem que o método geofísico da eletrorresistividade é uma ferramenta auxiliar de grande potencial de aplicação para caracterização de áreas com acúmulo de biogás, e por consequência, com viabilidade em empreendimentos de aproveitamento energético em aterros sanitários.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método geofísico da eletrorresistividade mostrou ter grande potencial de aplicação para estudos ambientais de investigação de biogás em aterros sanitários. No entanto, existem algumas considerações relevantes a serem apontadas no estudo desenvolvido.

As zonas de alta resistividades elétricas identificadas sugerem a existência de bolsões de biogás a partir da discussão dos resultados apresentada acima. Apesar da análise da investigação apontar que essas zonas com cores quentes, isto é, de alta eletrorresistividade correspondam aos bolsões de biogás, existe a possibilidade das medidas eletrorresistivas terem sofrido interferência na leitura pela possível existência de materiais não condutores nas camadas de resíduos, como plásticos e/ou borracha. Como o aterro não possui um meio homogêneo, não é possível afirmar de fato que as zonas encontradas correspondam a existência de biogás, uma vez que existem outros materiais pouco condutores de energia elétrica presentes no aterro.

Dessa forma, é sugerido que outros métodos geofísicos capazes de ler outros parâmetros sejam utilizados a fim de refinar os resultados e discussões sobre a geração do biogás em aterro sanitário.

A aquisição dos dados foi feita na época seca do ano. Os dados geofísicos podem variar bastante uma vez que a condutância é influenciada pela umidade do solo. Assim, uma análise mais completa seria repetir os ensaios em várias épocas do ano, abrangendo diversas condições climáticas, isto é, levando em consideração a estação chuvosa para comparação dos resultados e melhor compreensão da dinâmica funcional do aterro.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANTONIO, S.M. **Análise da variação da vazão e da concentração do metano presente nos gases gerados no aterro sanitário de Rio Claro-SP**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Estadual Paulista Campus de Rio Claro-SP, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2012. 58p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8419**: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. São Paulo, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8849**: Apresentação de projetos de aterros controlados de resíduos sólidos urbanos. São Paulo, 1985.
- ASQUITH, G. B.; GIBSON, C. R. **Basic Well Log Analysis for Geologists**. Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists, 1982. 234 p.
- BORTOLIN, J.R.M. **Monitoramento temporal da pluma de contaminação do aterro controlado de Rio Claro (SP) por meio do método da eletrorresistividade**. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente), Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rio Claro, SP, 2009.
- CASTRO, M.C.A.A; BELLO, P.P.G. **Evaluation of percentage of methane gas generated in the landfill of the Rio Claro city, Brazil: study of energetic potential**. In: Third International Symposium on Energy From Biomass and Waste, 2010, Veneza. Venice 2101-Third International Symposium on Energy From Biomass and Waste. Padova: Eurowaste-IWWg, 2010. v.1
- COMPANHIA MUNICIPAL DE LIMPEZA URBANA (COMLURB). **Potencial Energético do Biogás de Aterros**. Disponível em: <http://www.rio.rj.gov.br/comlurb/potencial_biogas.htm> Acesso em 15/06/2016.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL – CETESB / SECRETRARIA DO MEIO AMBIENTE – SMA. **Biogás: pesquisa e projetos no Brasil**. São Paulo: CETESB/SMA, 2006.186 p.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL – CETESB / SECRETRARIA DO MEIO AMBIENTE – SMA. **Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Urbanos**. São Paulo: CETESB/SMA, 2014. 126p. Disponível em: <<http://residuossolidos.cetesb.sp.gov.br/wpcontent/uploads/sites/36/2013/11/residuosSolidos2014.pdf>> Acesso em 15/05/2016
- COSTA SILVA, R. W. MALAGUTTI FILHO, W. MOREIRA, C.A. **Emprego do Método da Eletrorresistividade no Estudo da Contaminação Subterrânea do Cemitério Municipal de Vila Rezende, Piracicaba-SP**. Revista Brasileira de Geofísica, v. 27, n. 3, 2009. p. 389-399.
- DANESE, Modesto. **Geração e Utilização de Biogás**. Associação Brasileira de Conservação de Energia. Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), São Paulo. 1981.
- DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA DO ESTADO DE SÃO PAULO - DAEE. **Estudos de águas subterrâneas, Região Administrativa 5 - Campinas**. São Paulo, 1981. 607 p.
- ELLIS, D.V. & SINGER J.M. **Well logging for earth Scientists**. Netherlands: Springer, 2ºed., 2008. 699 p.

- GANDOLFO, O.C.B. **Um estudo do imageamento geolétrico na investigação rasa**. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. 215 p.
- GEORGAKI, I.; SOUPIOS, P.; SAKKAS, N.; VERVERIDIS, F.; TRANTAS, E.; VALLIANATOS, F.; MANIOS, T. **Evaluating the use of electrical resistivity imaging technique for improving CH₄ and CO₂ emission rate estimations in landfills**. *Science of the Total Environment*, v. 389, p. 522-531. 2008.
- GEOTOMO SOFTWARE. **RES2DINV (v3.54.) and RES3DINV (v.2.14) for Windows 98/ME/ 2000/NT/XP. Geoelectrical Imaging 2D & 3D**. 2004, 130p.
- GRIFFITHS, D. H.; BAKER, R. D. **Two-dimensional resistivity imaging and modeling in areas of complex geology**. *Journal of Applied Geophysics*, 29, p. 211-226. 1993.
- HENRIQUES, M. R. **Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos: Uma Abordagem Tecnológica**. Dissertação (Mestrado) – COPPE- Universidade Federal do Rio de Janeiro., 2004. 190p.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Estimativa Populacional-2015**. Disponível em <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=354390&search=sao-paulo|rio-claro>> Acesso em 25/04/2016.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Guidelines for National Greenhouse Inventories: Reference Manual**. vol. 3. 1996.
- KELLER, G.V. & FRISCHKNECHT, F.C. **Electrical methods in geophysical prospecting**. New York: Pergamon Press, 1966. 562 p.
- KNÖDEL, K.; LANGE, G.; VOIGT, H. J. **Environmental Geology: Handbook of Field Methods and Case Studies**. Berlin: Springer-Verlag, 2007, 1374p.
- LAQUIDARA, M.J.; LEUSCHNER, A.P. & WISE, D.L. **Procedure for determining potential gas quantities in an existing sanitary landfill**. *Water Science Technology*. 18(12), p.151-162. 1986.
- LEITE, L. E. H. B. C., MAHLER, C. F., BRITO FILHO, L. F. **Avaliação do potencial de recitas derivadas do biogás de aterros**. 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005.
- LOKE, M. H.; BAKER, R. D. **Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by quasi-Newton method**. *Geophysical Prospecting*, 44, p.131-152, 1996.
- MASSEY, M.L.; POHLAND, F.G. **Phase separation of anaerobic stabilization by kinetic controls**. *J. Water pollut. Control. Fed.* 50:2204, 1978.
- MENDES, L. G. G. **Proposta de um sistema para aproveitamento energético de um aterro sanitário regional na cidade de Guaratinguetá**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2005, 179p.

MONDELLI, G. **Integração de diferentes técnicas de investigação para avaliação da poluição e contaminação de uma área de disposição de resíduos sólidos urbanos**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2008.

MONTEIRO, C. A. de F. **A Dinâmica Climática e as Chuvas no Estado de São Paulo – estudo geográfico sob forma de atlas**. São Paulo: Universidade de São Paulo/ Instituto de Geografia, 1973. 129 p.

MOREIRA, C. A.; BRAGA, A. C. O.; FRIES, M. **Degradação de resíduos e alterações na resistividade elétrica, pH e Eh**. Revista Brasileira de Geofísica, 27(2), p.283-293, 2009.

MOREIRA, C. A.; BRAGA, A. C. O.; HANSEN, M. A. F. **Estimativa do tempo de produção de chorume em aterro controlado por meio de medidas de resistividade elétrica**. Revista Brasileira de Geociências, 41(3), p.549-557, 2011.

MUSSETT, A. E.; KHAN, M. A. **Look into the Earth: an introduction to geological geophysics**. New York: Cambridge University Press, 2009. 493 p.

MUYLAERT, M. S., (coord.) AMBRAM, R.; CAMPOS, C. P.; MONTEZ, E. M.; OLIVEIRA, L. B.; PEREIRA, A. S.; REIS, M. M. **Consumo de Energia e Aquecimento do Planeta – Análise de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL – do Protocolo de Quioto – Estudo de Caso**. Rio de Janeiro, Editora da COPPE, 2000.

OONK, J. & BOON, A. **Landfill gas formation, recovery and emissions. – Institute of environmental and energy technology (TNO)**. Netherlands: Apeldoorn, p.95-203, 1995.

ORELLANA, E. **Prospeccion Geoelectrica en Corriente Continua**. Biblioteca Técnica Philips, Madrid: Paraninfo, 523 p. 1972

PAVAN, M.C.O. **Geração de Energia a Partir de Resíduos Sólidos Urbanos: Avaliação e Diretrizes para Tecnologias Potencialmente Aplicáveis no Brasil**. Tese de Doutorado, Programa de Pós Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010, 186p.

PELCZAR JR, M.; CHAN, E. C. S.; KRIEG, N. R. **Microbiologia: conceitos e aplicações**. 2.ed. São Paulo: MAKRON Books, 1996. 517 p.

POHLAND, F. G.; GOULD, J. P. **Co-disposal of municipal refuse and industrial waste sludge in landfills**. Water Science Technology. v.18, n.12, p.177-192. 1986.

POHLAND, F.G.; HARPER, S.R. **Critical review and summary of leachate and gas production from landfills**. Tech. project n.E20 G01, 1985.

PROIN/CAPES e UNESP/IGCE. **Material Didático: arquivos de transparências (CD-ROM)**. Rio Claro: Departamento de Geologia Aplicada, 1999.

RELATÓRIO AMBIENTAL PRELIMINAR – RAP. **Aterro sanitário e industrial do município de Rio Claro – SP**. Ação engenharia. São Paulo- SP. 2000.

SEIMETZ, E. X. **Estudos geofísicos ao longo do futuro trecho norte do metrô de Brasília**. Dissertação de mestrado – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2012. 97p.

SILVA, T. N. **Avaliação da produção e qualidade do gás de aterro para energia no aterro sanitário dos Bandeirantes - SP.** Dissertação de mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental. Universidade Vale do Itajaí- Santa Catarina, 2006.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H. & VINIL, S. **Integrated solid wastemanagement. Engineering principles and management issues.** New York: Irwin MacGraw-Hill, 1993.978 p.

TELFORD, W.M.; GELDART, L.P.; SHERIFF, R.E. **Applied Geophysics. 2º ed.,** New York: Cambridge University Press, 2004. 774 p.

THEMELIS, N.J. & ULLOA, P.A. **Methane generation in landfills.** Renewable Energy, vol. 32, p. 1243-1257. 2007

TROPPEMAIR, H. **Atlas da Qualidade Ambiental e de Vida de Rio Claro.** 1992.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **A guide for methane mitigation projects: gas to energy at landfills and open dumps.** USEPA – Office of air and radiation, USEPA, 1996.

VOLGELSANG, D. **Environmental Geophysics A practical guide.** 1ª edição. Berlin: Springer,1995.173 f.

ZAINE, J. E. **A geologia da Formação Rio Claro na Folha Rio Claro (SP).** Tese (Doutorado). Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas – UNESP, 1994. 192p.