

Trabalho de Formatura

Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

RELAÇÕES ENTRE PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO E
VARIAÇÕES NA RESISTIVIDADE ELÉTRICA

Thaís Munhoz

Prof. Dr. César Augusto Moreira

Rio Claro (SP)

2016

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

THAÍS MUNHOZ

RELAÇÕES ENTRE PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM
ATERRO SANITÁRIO E VARIAÇÕES NA RESISTIVIDADE
ELÉTRICA

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 Munhoz, Thaís
M966r Relações entre produção de biogás em aterro sanitário e
 variações na resistividade elétrica / Thaís Munhoz. - Rio
 Claro, 2016
 45 f. : il., figs., gráfs., tabs., mapas

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

Orientador: César Augusto Moreira
Coorientador: Marcus Avezum Castro

1. Geofísica. 2. Matéria orgânica. 3. Resistividade
elétrica. I. Título.

THAÍS MUNHOZ

RELAÇÕES ENTRE PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM
ATERRO SANITÁRIO E VARIAÇÕES NA RESISTIVIDADE
ELÉTRICA

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

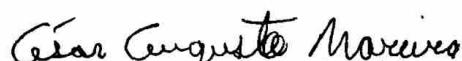
Prof. Dr. César Augusto Moreira

Prof. Dr. Antonio Celso de Oliveira Braga

MSc. Lívia Portes Innocenti Helene

Rio Claro, 28 de junho de 2016.


Assinatura do(a) aluno(a)


assinatura do(a) orientador(a)

AGRADECIMENTOS

Começo dedicando este trabalho à minha família, aos meus amados pais, Angela e Dorival, que são meus maiores exemplos e fonte de inspiração. À vocês que me deram todas as ferramentas para que eu chegasse aqui, que me apoiam e dedicam a vida a mim e minhas irmãs, que me dão o suporte diário, incentivo e amor incondicional.

Às minhas irmãs, Tatiana e Tania, que sempre estão torcendo por mim, pela minha felicidade e sucesso, são a melhor torcida organizada que eu tenho. Vocês, família querida, são o meu maior orgulho, e em vocês eu me inspiro todos os dias.

Agradeço ao meu namorado, Fábio, por todo apoio durante a execução deste trabalho, pelos conselhos, pelo amor, compreensão e carinho de todo dia, você é um anjo em minha vida.

Meus agradecimentos àqueles que tem todo meu respeito e admiração: Professores, que tem essa profissão tão completa, que se dedicam e estão em constante aperfeiçoamento para dividir conhecimento. À vocês que mantem vivo o compromisso de educar. Agradeço alguns professores que marcaram minha graduação: Prof. Dr. Antonio Celso de Oliveira Braga, Prof. Dr. Edson Vasquez, Prof. Dr. Marcelo Loureiro Garcia, Prof. Dr. Marcus Avezum Castro, Prof. Dr., Prof. Dr. Nelson Callegari Junior e ao Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi, profissionais como vocês fazem a diferença.

Em especial, agradeço meu orientador, Prof. Dr. César Augusto Moreira. Expresso minha enorme gratidão por todos os ensinamentos, por estar sempre solícito em explicar e ajudar, não só apenas na elaboração do TCC. Obrigada por todos os conselhos e conversas, sempre positivas e construtivas.

Às minhas queridas amigas, Ana, Debs, Fer Bacaro, Gabi, Globs, Luna, Shera, Taís Salles, Tati e Stella, por estarem presente de forma intensa durante todos esses anos, por serem minha família longe de casa. Meu agradecimento às amigas Fer Cavallari e Livia, que além da vivência universitária foram parceiras nas aquisições de dados no aterro sanitário. Vocês foram essenciais durante toda essa fase universitária, levo vocês comigo no coração.

Não posso deixar de agradecer a minha turma de Engenharia Ambiental de 2010, meus queridos colegas de sala, cada um com seu jeitinho, me proporcionaram momentos incríveis e aprendizados diários. Obrigada a todos vocês que dividiram comigo momentos inesquecíveis ao longo dos 5 anos que passamos juntos.

Agradeço ao CNPq pela oportunidade de participar do programa Ciências sem Fronteiras, um intercâmbio acadêmico que tantas portas abriu e oportunidades diferenciadas proporcionou. À Universidade de Brighton, por proporcionar uma experiência acadêmica enriquecedora. Às amigas que tive a oportunidade de construir ao longo dessa experiência: Carol, Júlia, Mari, Sara e Sophia; pessoas únicas e maravilhosas, as quais tive a honra de dividir a “casa” e as melhores experiências ao longo dos 14 meses longe de casa. Obrigada por serem minha família durante esse tempo.

Agradeço ainda ao Programa de Formação de Recursos Humanos em Geologia do Petróleo e Ciências Ambientais Aplicadas ao Setor de Petróleo & Gás e de Biocombustíveis (PRH-05), Programa da ANP/PETROBRAS.

RESUMO

A decomposição da matéria orgânica presente na composição dos resíduos sólidos dispostos em aterro sanitário é responsável pela produção de biogás. Este gás produzido em aterro pode ser uma importante fonte de energia futuramente; no entanto, são escassos os trabalhos e as técnicas para estimar a produção do biogás em subsuperfície. Nesse contexto, a eletrorresistividade – método já consagrado em estudos de zonas contaminadas por nicrochorume, lixiviado e para o monitoramento desses contaminantes – é utilizada neste trabalho para avaliar a relação que existe entre a resistividade elétrica da subsuperfície, as vazões de biogás medidas em superfície e as zonas de acúmulo de biogás. Este trabalho compara as vazões de biogás em quatro drenos do aterro sanitário de Rio Claro (SP), com os resultados da resistividade elétrica, na área de influência dos drenos, obtidas ao longo de 13 linhas de tomografia elétrica. Os dados de resistividade obtidos foram transformados em modelos 2D de resistividade *versus* profundidade, no *software* RES2DINV; posteriormente, os mesmos dados foram interpolados na plataforma Oasis Montaj e transformados em blocos 3D. A comparação dos dados de vazão de biogás nos drenos selecionados (em m³/h), com os dados de resistividade elétrica, apontam a eficácia do uso da eletrorresistividade na identificação e determinação de áreas com acúmulo de biogás em aterros sanitários. A existência de áreas com altos valores de resistividade elétrica ocorre nas imediações dos drenos com maiores fluxos de biogás, devido ao caráter isolante deste.

Palavras – chave: matéria orgânica, biogás, aterro sanitário, resistividade elétrica

ABSTRACT

The decomposition of organic matter present in the composition of solid waste disposed in landfill is responsible for the production of biogas. The gas produced in landfills can be an important source of energy in the future; however, there are few studies and techniques to estimate the production of biogas in the subsurface. In this context, the electrical resistivity - method already established in studies of contaminated areas by necrochorume, leached and monitoring of these contaminants - is used in this study to evaluate the link between the electrical resistivity of the subsurface, the flow of biogas measures in surface and biogas accumulation zones. This paper compares the biogas flow in four drains from the landfill of Rio Claro (SP), with the results of the electrical resistivity in the area of influence of drains, obtained over 13 lines of Electrical Resistivity Tomography (ERT). The resistivity data were transformed in 2D models of resistivity versus depth using the software RES2DINV; later on, the same data were interpolated in Oasis Montaj platform and transformed into 3D blocks. The comparison of the biogas flow data in selected drains (m^3/h), with the electrical resistivity data indicate the efficacy of the electrical resistivity in the identification and determination of areas with biogas accumulation in landfills. The existence of areas with high electrical resistivity values occurs in the surrounding areas of the drains with larger biogas flows due to the insulating character of the gas.

Key words: organic matter, biogas, landfill, electrical resistivity

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
2. OBJETIVOS.....	11
3. ÁREA DE ESTUDO.....	12
3.1. Aterro Sanitário Municipal.....	12
3.2. Geologia local.....	14
4. PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM ATERROS SANITÁRIOS (materiais e métodos)...	15
4.1. Relação entre a matéria orgânica e a produção de biogás.....	15
4.2. Fatores que influenciam a geração do biogás.....	18
5. GEOFÍSICA.....	21
5.1. Método Eletorresistividade.....	22
5.2. A técnica de tomografia elétrica e o arranjo Schlumberger.....	23
5.3. Aplicações da geofísica em estudos ambientais.....	24
6. MATERIAIS E MÉTODOS.....	26
6.1. Seleção da área de estudo no Aterro Sanitário de Rio Claro.....	26
6.2. Aquisição e tratamento de dados.....	27
7. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	30
8. CONCLUSÃO.....	38
9. REFERÊNCIAS.....	39

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Localização do aterro sanitário municipal de Rio Claro (SP)	12
Figura 2A	Exemplo da manta de PEAD na lateral da vala.	14
Figura 2B	Dreno de gás presente no aterro sanitário de Rio Claro (SP)	14
Figura 3	Ilustração das diferentes etapas metabólicas da digestão anaeróbica	16
Figura 4	Fases de geração de biogás em aterros de Resíduos Sólidos	17
Figura 5	Princípio do método de Eletroresistividade com um arranjo de quatro eletrodos	23
Figura 6	Arranjo eletrodico Schlumberger	24
Figura 7	Localização dos drenos de gás no aterro sanitário de Rio Claro (SP)	26
Figura 8	Localização da área de estudos com as 13 linhas de aquisição de dados.	27
Figura 9	Espaçamento das linhas de análise entre dois drenos no aterro sanitário de Rio Claro (SP).	28
Figura 10A	Eletrodos e conjunto de cabos	28
Figura 10B	Resistivímetro Terrametes LS	28
Figura 11	Termo-anemômetro digital portátil TESTO, modelo 405-V1	29
Figura 12	Modelos de inversão em termos de resistividade elétrica das linhas 1 a 5.	31
Figura 13	Modelos de inversão em termos de resistividade elétrica das linhas 6 a 9	32
Figura 14	Modelos de inversão em termos de resistividade elétrica das linhas 10 a 13	33
Figura 15	Modelo de visualização 3D de resistividade elétrica, com o posicionamento das linhas de tomografia elétrica dos drenos de biogás e das respectivas vazões (em m ³ /h)	34
Figura 16	Modelo de visualização 3D de resistividade elétrica, com o posicionamento das linhas de tomografia elétrica dos drenos de biogás e das respectivas vazões (em m ³ /h)	35
Figura 17	Modelo de visualização 3D de resistividade elétrica, com o posicionamento das linhas de tomografia elétrica dos drenos de biogás e das respectivas vazões (em m ³ /h)	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Características do aterro sanitário municipal de Rio Claro- SP	14
Tabela 2	Dados de vazão do biogás (em m ³ /h) nos drenos 25, 26, 27 e 28	30

1. INTRODUÇÃO

Um dos grandes problemas da atualidade está relacionado aos impactos ambientais causados pelo homem ao meio ambiente. O crescimento desordenado dos centros urbanos e o conseqüente aumento na geração de resíduos ocasionam grandes problemas relacionados à forma correta de destinação e disposição destes resíduos.

De acordo com o censo de 2008, realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), no Brasil, 50,8% dos resíduos sólidos urbanos gerados foram destinados para vazadouros a céu aberto (lixões), 22,5% foram destinados a aterros controlados, e 27,7% destinados aos aterros sanitários.

O aterro sanitário é uma técnica de deposição de resíduos sólidos que, baseado em normas de engenharia, propõe, em teoria, um confinamento seguro de poluição e também preventivo, no que se refere aos impactos potenciais sobre o meio ambiente, a saúde e a segurança pública.

Os resíduos domiciliares, no Brasil, são compostos, em sua maioria, por matéria orgânica. Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABERLPE), no ano de 2012, a porcentagem de matéria orgânica presente nos resíduos sólidos urbanos foi de 51,4% contra 31,9% de recicláveis, e 16,7% de outros tipos de materiais.

A grande quantidade de matéria orgânica contida nos resíduos sólidos domiciliares brasileiros contribui significativamente para os impactos ambientais associados à disposição dos resíduos orgânicos em aterros, como a geração de gases de efeito estufa e de líquidos percolados com elevado potencial de contaminação de solos, de águas superficiais e subterrâneas, a geração de odores e a atração de vetores de doenças (CASTRO, 2001). Tal fato está relacionado à biodegradação anaeróbica da fração orgânica aterrada e à conseqüente geração de lixiviados e gases, como o metano e dióxido de carbono, que juntos formam o biogás.

O biogás gerado em aterro sanitário, composto por cerca de 50% de gás metano, possui um alto poder calorífico, o que o torna uma fonte alternativa de energia, além do fato de sua coleta e de seu aproveitamento contribuírem para a diminuição de impactos ambientais (ICLEI- Brasil, 2009).

Os primeiros projetos de aproveitamento energético de biogás tiveram início nos anos 70, nos Estados Unidos, com o objetivo de controlar as emissões de metano e aproveitar uma nova fonte de energia frente à crise do petróleo. Posteriormente, países da Europa também

iniciaram projetos semelhantes. Atualmente, existem mais de 500 aterros no mundo que possuem plantas de aproveitamento energético de biogás (ENSINAS, 2003).

Assim, com a crescente problemática ambiental e a busca de novos métodos de análise do comportamento e da possibilidade de preservação do meio físico, a área das geociências vem experimentando um aumento em seu campo de atuação.

Neste enfoque, a utilização integrada de técnicas geofísicas surge como uma metodologia eficiente de investigação, a qual possibilita análises rápidas e eficientes a baixo custo operacional. Os métodos geofísicos, em sua maioria, são técnicas não invasivas, capazes de fornecer informações precisas sobre as condições geológicas e hidrogeológicas da subsuperfície, de forma indireta (ASQUITH & GIBSON, 1982).

Os principais métodos geofísicos para investigação de contaminantes são: eletrorresistividade, potencial espontâneo (SP), radar de penetração no solo (GPR) e, eventualmente, magnometria.

A eletrorresistividade é um método geofísico largamente utilizado em estudos ambientais e possui variadas aplicações. O funcionamento do método é baseado no fenômeno de geração artificial de correntes elétricas, que são introduzidas no solo, e as diferenças de potencial resultantes são lidas em superfície (KNÖDEL *et al.*, 2007).

Além disso, o método da eletrorresistividade permite compreender as modificações em propriedades físicas, na presença de contaminantes no ambiente geológico, o que é essencial para a interpretação geofísica em estudos ambientais. Os métodos geofísicos são bastante utilizados em áreas de disposição de resíduos sólidos, com objetivo de delinear plumas de contaminação em solo e em água subterrânea. Neste estudo, o método geofísico da eletrorresistividade foi utilizado para caracterizar áreas com acúmulo de biogás.

2. OBJETIVOS

Este trabalho propõe efetuar medidas de resistividade elétrica por meio da técnica de tomografia elétrica no aterro sanitário municipal de Rio Claro (SP), para posterior correlação de medidas de vazão de biogás em drenos da área, com medidas de resistividade elétrica, cujo objetivo é verificar eventuais relações entre os parâmetros.

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O município de Rio Claro está localizado no centro-leste do Estado de São Paulo, a 173 km da capital paulista com ligação através do sistema Anhanguera-Bandeirantes e rodovia Washington Luiz. Abrange uma área de 498,43km² e contempla uma população de 186.253 habitantes (IBGE, 2015)

O clima da região de Rio Claro - SP pode ser considerado tropical com duas estações definidas - Cwa na classificação de Koeppen, ou seja, w: seca no inverno, a: mês mais quente com temperatura superior a 22°C, ou tropical alternadamente seco e úmido, controlado por massas tropicais e equatoriais, que predominam em mais de 50% do ano (MONTEIRO, 1973).

3.1 Aterro sanitário municipal

O aterro municipal localiza-se às margens da Rodovia Cornélio Pires (SP-127) a aproximadamente 8,0 km do centro da cidade de Rio Claro e 9,5 km da sede da UNESP de Rio Claro. As coordenadas correspondentes a sua localização são 47° 34' 73'' W e 22° 27' 72'' S (Figura 1).



Figura 1: Localização do aterro sanitário municipal de Rio Claro (SP)

Fonte: adaptado de SEPLADEMA (2014)

O aterro sanitário recebe resíduos sólidos domiciliares (classe II A), provenientes da coleta regular no município de Rio Claro (SP). A coleta dos resíduos domiciliares é diária, e abrange praticamente 100% da área urbana do município. No ano de 2014, o aterro sanitário recebeu, em média, 174,23 toneladas de resíduos por dia (CETESB, 2014). Sua operação é diurna, de segunda a sexta-feira, encerrando as atividades diárias com a cobertura dos resíduos por uma camada de solo.

Segundo a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), no ano de 2014, o aterro sanitário de Rio Claro (SP) aumentou sua nota de avaliação no Índice de Qualidade de Resíduos (IQR), recebendo 8,6 de nota, o que enquadra o município em “Condição Adequada” pelo órgão estadual.

O aterro conta com sistema de impermeabilização de base com uma manta de polietileno de alta densidade (PEAD) (Figura 2A), sistemas de drenagem superficial, sistema de drenagem de percolados, captação e acumulação de líquidos percolados, e sistema de captação de gases.

O sistema de drenagem de biogás tem a função de drenar os gases provenientes da decomposição da matéria orgânica, evitando sua migração através dos meios porosos que constituem o subsolo. A migração do biogás deve ser controlada pela execução de rede de drenagem adequada, colocados em pontos determinados do aterro no sentido vertical, desde o sistema de impermeabilização de base até acima do topo da camada de cobertura (D’ALMEIDA, 2000).

Os drenos de biogás nos aterros sanitários são normalmente constituídos por linhas de tubos perfurados, sobrepostos e envoltos por uma camisa de brita (de espessura igual ao diâmetro do tubo utilizado, atravessando verticalmente a massa de resíduos aterrados, desde a base até a superfície superior, constituindo uma chaminé (Figura 2B). O dimensionamento desses drenos depende da vazão de biogás a ser drenada; como não existem modelos de cálculos comprovados, normalmente os drenos são constituídos de forma empírica (D’ALMEIDA, 2000).

Tabela 1: Características do aterro sanitário 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: Relatório Ambiental Preliminar (RAP), Secretaria do Planejamento e do Meio Ambiente de Rio Claro - SP

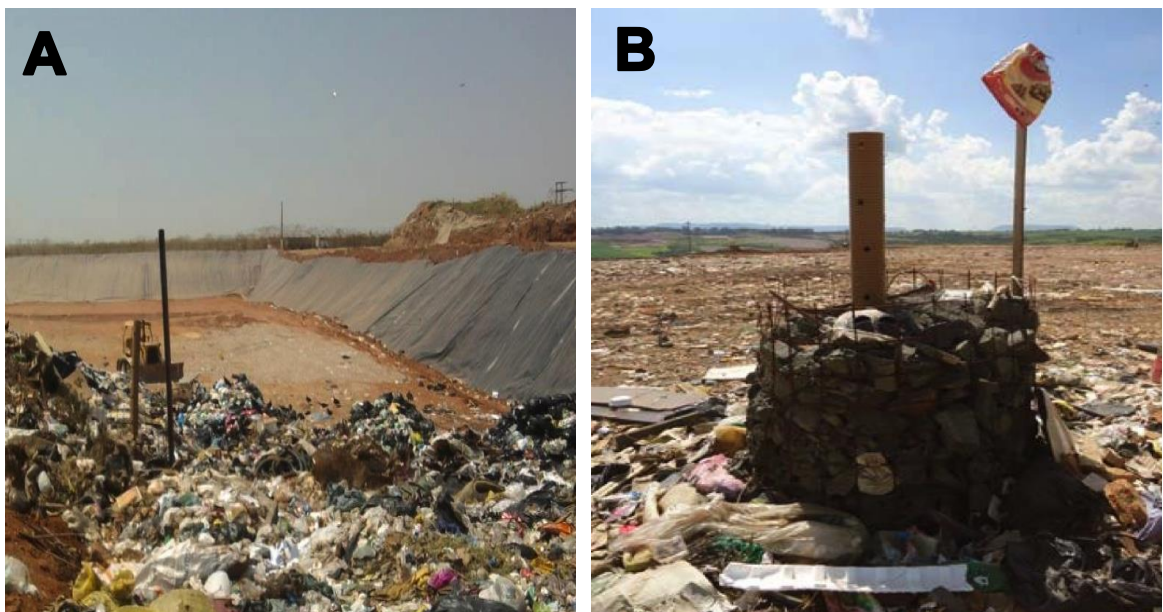


Figura 2: A) Exemplo da manta de PEAD na lateral da vala. B) Dreno de gás presente no aterro sanitário de Rio Claro (SP)

Fonte: SEPLADEMA (2014)

3.2 Geologia Local

Os solos da região são classificados como areno-argiloso e argilo-siltoso com permeabilidade natural. O nível d'água na área do aterro varia entre 5,0 e 14,0 metros (Relatório Ambiental Preliminar do aterro sanitário de Rio Claro – SP).

Segundo o Instituto de Pesquisas tecnológicas - IPT (1981), a área de estudo esta localizada, geologicamente, no setor paulista do flanco nordeste da bacia sedimentar do Paraná, representadas por rochas sedimentares e vulcânicas das eras Paleozóica (Grupo Itararé;

formações Tatuí, Iratí e Corumbataí), Mesozóica (formações Pirambóia e Serra Geral) e Cenozóica (Formação Rio Claro e depósitos recentes).

O município de Rio Claro está inserido nas províncias III – Depressão Periférica e IV – Cuestas Basálticas (IPT, 1981), e possui características morfológicas bem definidas como uma densa área de drenagem, morrotes e colinas (ZAINE, 1994)

Os principais solos que recobrem a área são o podzólico vermelho-amarelo de textura média/argilosa e o latossolo vermelho-escuro de textura argilosa e muito argilosa. Também ocorrem latossolo vermelho-amarelado, latossolo roxo (“terra roxa”), solos hidromórficos e litólicos (PRADO *et al.*, 1981).

O município de Rio Claro, apresenta em sua maioria, solos de textura arenosa, provocando a lixiviação de horizontes, o que torna os solos pobres e ácidos (ZAINE, 1994)

4. PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM ATERROS SANITÁRIOS

A formação do biogás em aterros é possível apenas pela grande variedade de resíduos orgânicos em sua composição, tais como lixo doméstico, animais mortos, resíduos de atividades agrícolas, lodo de esgoto entre outros. Segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, ANP (2007), o biogás advindo de aterros sanitários possui tipicamente, em sua composição, de 40% a 55% de metano (CH₄), 40% a 30% de gás carbônico (CO₂), 20% a 15% de O₂ e até 200ppm de gás sulfídrico (H₂S).

4.1 Relação entre a matéria orgânica presente nos resíduos e a produção de biogás

A decomposição de todo resíduo orgânico que posteriormente dará origem ao biogás acontece por meio de dois processos: o primeiro é a decomposição aeróbia e ocorre logo após a deposição do resíduo; no aterro o segundo processo acontece após o isolamento do resíduo por uma camada de solo que reduz a quantidade de oxigênio presente e dá início a decomposição anaeróbica com geração de gases e lixiviados.

Segundo Bilitewski *et al.* (1994), a formação do biogás se dá através da decomposição dos compostos orgânicos por uma variedade de populações de bactérias em ambiente anaeróbico. O processo é iniciado com a hidrólise dos materiais complexos em moléculas, principiado pelo grupo de bactérias fermentativas. Em seguida, ocorre o rápido crescimento dos ácidos orgânicos. Os produtos da decomposição desta etapa são convertidos por outro tipo de bactéria – as acetogênicas –, em acetato, dióxido de carbono e hidrogênio. Tais substâncias são, então, usadas pelas bactérias metanogênicas como substrato para a conversão dos compostos orgânicos em metano e dióxido de carbono.

A Figura 3 ilustra as diferentes etapas metabólicas da digestão anaeróbica, ou seja, a digestão microbiológica de frações orgânicas em ambiente anaeróbio, citadas acima (PELCZAR *et al.*,1997):

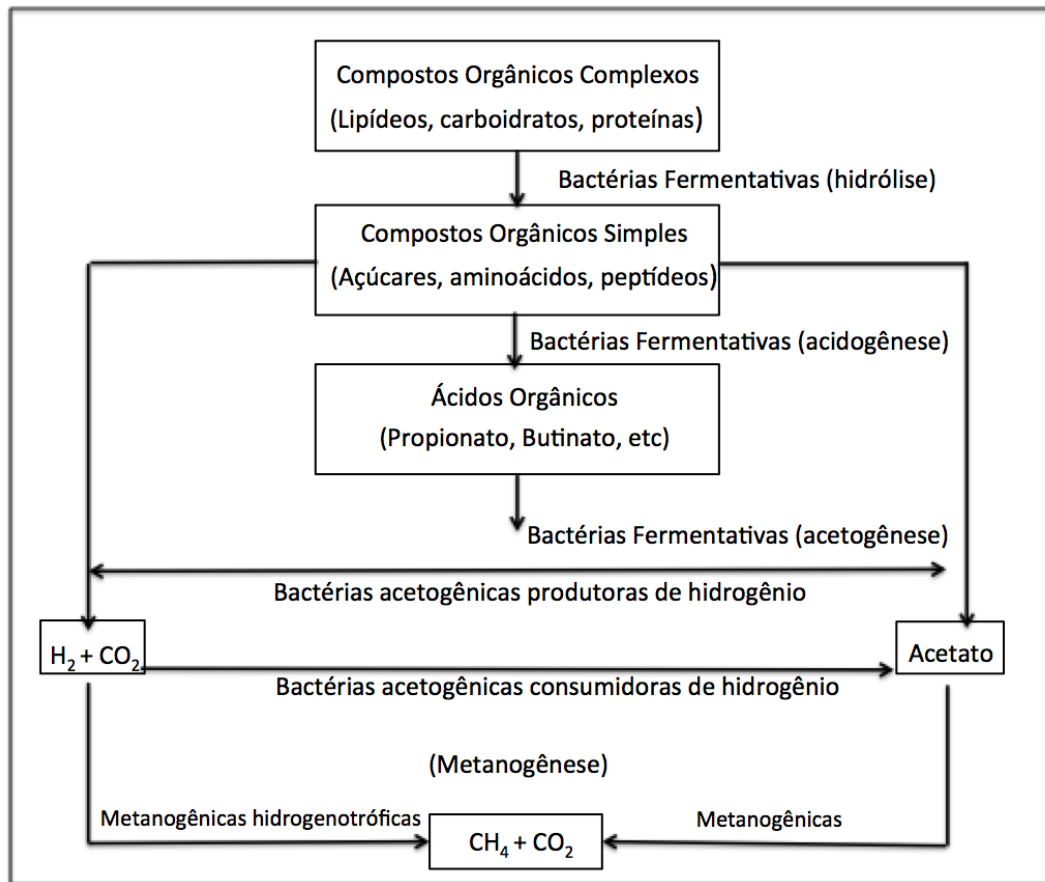
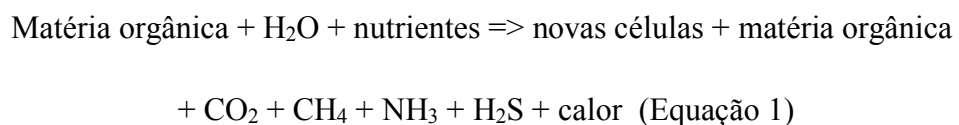


Figura 3: Ilustração das diferentes etapas metabólicas da digestão anaeróbica

Fonte: Adaptado de PELCZAR *et al.* (1997), p. 517

Alguns modelos de degradação foram desenvolvidos com a intenção de demonstrar as diferentes etapas envolvidas no processo de decomposição da matéria orgânica no ambiente confinado de um aterro sanitário.

Segundo Tchobanoglous *et al.* (1993), a porção biodegradável da fração orgânica dos resíduos sólidos domiciliares pode ser convertida biologicamente em condições anaeróbias para gases contendo dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄), sendo esse processo representado pela equação (1):



Desse modo, os principais produtos finais são dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), amônia (NH₃), gás sulfídrico (H₂S) e matéria orgânica resistente. Na maioria dos

processos de conversão, o dióxido de carbono e o metano constituem mais de 99% do total dos gases produzidos (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 1993).

Tchobanoglous *et al.* (1993) fazem a descrição da geração de biogás em aterros sanitários contemplando cinco etapas, ou apenas quatro quando a etapa de transição é desconsiderada.

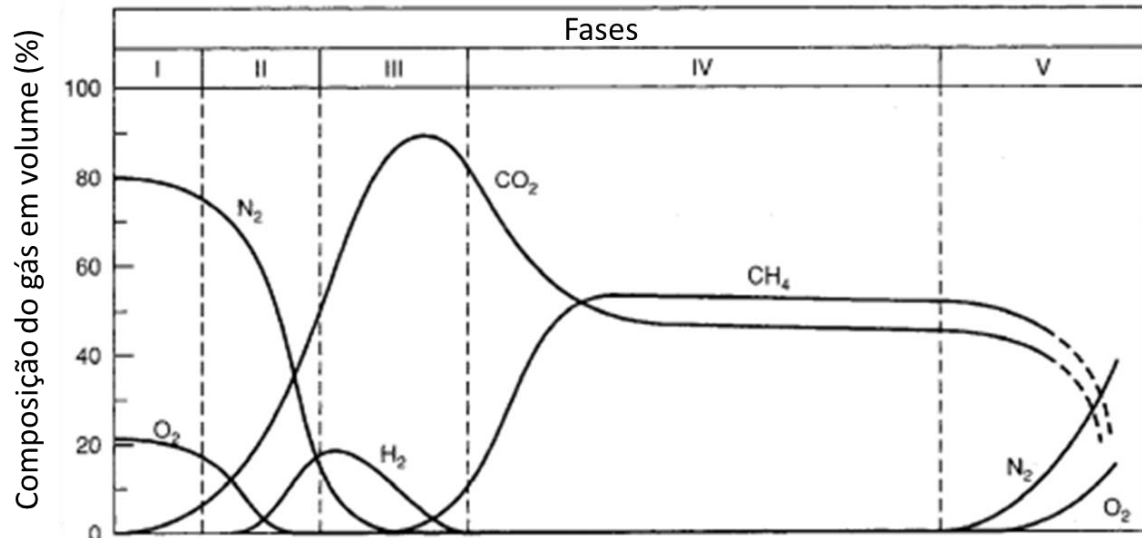


Figura 4: Fases de geração de biogás em aterros de Resíduos Sólidos

Fonte: Tchobanoglous *et al.* (1993), p. 678-686

Fase I – Ajuste Inicial: esta é a fase em que os resíduos são depositados no aterro e sua fração biodegradável sofre a decomposição biológica em condições aeróbias. A fonte principal de microrganismos aeróbios e anaeróbios, responsável pela decomposição dos resíduos, é o solo empregado na cobertura diária. Outras fontes de microrganismos podem ser o lodo de estações de tratamento, depositado em alguns aterros, e a recirculação do chorume. Esta é a fase em que a decomposição aeróbia se estende por um período de poucos dias após a execução da camada de cobertura, o que causa queda nas taxas de oxigênio. Devido ao fato da Fase I ser relativamente curta e compreender a decomposição aeróbia, ela é, algumas vezes, associada com a Fase II, sendo reportadas como uma única fase: a Fase Aeróbia.

Fase II – Fase de Transição: decrescem os níveis de oxigênio e a fase anaeróbia é iniciada. O aterro é submetido a condições anaeróbias, já que a quantidade de oxigênio aprisionada é limitada, é estabelecida então uma condição de ambiente redutor. Há a troca dos aceptores de elétrons do oxigênio para os nitratos e os sulfatos. A redução destas últimas moléculas produzirá nitrogênio e sulfeto de hidrogênio/gás sulfídrico. Além disso, o nível de dióxido de carbono começa a aumentar, o que ocasiona a formação de ácido carbônico e a

diminuição de pH do chorume para a faixa ácida. As temperaturas do resíduo são mais quentes durante esta Fase, alcançando de 54 a 71°C.

Fase III – Fase Ácida: fase em que as reações iniciadas na fase de transição são aceleradas com a produção significativa de ácidos orgânicos e pequenas quantidades de gás hidrogênio. É a fase que antecede a formação do metano. As bactérias acidogênicas convertem, então, os compostos hidrolisados em ácidos orgânicos voláteis (AOV). Os ácidos, por sua vez, causam uma mudança no pH, o que causa aumento nas concentrações de metais pesados no chorume.

Fase IV – Fase Metanogênica: nesta Fase, os AOV e o hidrogênio produzidos na Fase Acidogênica são convertidos em metano pelas bactérias metanogênicas. Tanto a produção de ácidos quanto a fermentação do metano ocorrem nesta Fase; contudo, a fermentação do metano é predominante. As mais altas taxas de geração de gás ocorrem durante esta fase. Na medida em que os AOV são consumidos, o pH do chorume aumenta para valores próximos ao neutro e as concentrações de metais pesados diminuem. Sulfatos e nitratos são reduzidos para sulfetos e amônia.

Fase V – Fase de Maturação: esta fase ocorre após grande quantidade do material ter sido biodegradado e convertido em CH_4 e CO_2 . A taxa de geração do gás diminui consideravelmente, pois a maioria dos nutrientes disponíveis foi consumida nas fases anteriores e os substratos que restam no aterro são de degradação lenta. Isto implica uma consequente queda ou término da produção de biogás.

Visto que os aterros são heterogêneos e todo resíduo não é colocado ao mesmo tempo, as Fases descritas acima ocorrem simultaneamente em diferentes áreas e profundidades de um aterro ativo ou recentemente encerrado. A duração de cada fase de geração de gás irá variar conforme a distribuição dos componentes orgânicos no aterro, a disponibilidade de nutrientes, a umidade dos resíduos, a passagem de umidade pelo aterro e o grau de compactação inicial.

4.2 Fatores que influenciam a geração do biogás

A disponibilidade de macronutrientes em um aterro sanitário tem efeito, tanto sobre o volume dos lixiviados gerados a partir de processos microbianos, quanto na composição dos gases gerados. Segundo Brito Filho (2005), a capacidade de um aterro gerar gás depende de muitos fatores, como a composição dos resíduos, a umidade de constituição, o tamanho das

partículas de resíduos, a idade do resíduo, o pH, a temperatura e outros. Os fatores que afetam a geração de biogás estão descritos a seguir (BRITO FILHO, 1995; BORBA, 2006):

- A) Composição dos resíduos: grande parte dos resíduos residenciais e comerciais dispostos em um aterro de resíduo sólido municipal é passível de decomposição. O restante consiste de vários materiais inertes não decompostáveis. Quanto mais facilmente é decomposta a fração orgânica do resíduo, mais acelerada será a taxa de produção de gás no aterro, resíduos de alimentos são um exemplo desta categoria. Deste modo, quanto maior o percentual de materiais biodegradáveis, maior será a quantidade de substrato para os microrganismos responsáveis pela biodegradação do resíduo, o que eleva a taxa de geração de gases.
- B) Umidade: em muitos aterros, depois da composição gravimétrica dos resíduos, o teor de umidade é o fator mais significativo para a taxa de produção de gás no local. Quanto maior o teor de umidade, maior será a taxa de produção de gás. A pluviosidade regional, a composição do solo, o percentual de água infiltrada no solo, a umidade com o que o resíduo chega ao aterro e a liberação de água durante a decomposição do resíduo são fatores que influenciam a degradação e, por consequência, a produção de gás. Teoricamente, a condição ideal para a geração de gás é a total saturação do resíduo. Por outro lado, se o resíduo estivesse saturado, a extração de gás no aterro seria extremamente difícil.
- C) Tamanho das partículas: a partícula de resíduo com uma área superficial maior decomporá mais rapidamente do que uma partícula com uma área menor. Por exemplo, a decomposição de um tronco de madeira ocorrerá de modo muito mais rápido se este for cortado em pedaços menores do que se for disposto inteiro.
- D) Idade do resíduo: a geração de biogás em um aterro possui duas variáveis dependentes do tempo: tempo de atraso e tempo de conversão. O tempo de atraso é o período desde a disposição dos resíduos até o início da geração do metano. Já o tempo de conversão é o período compreendido da disposição dos resíduos até o final da geração do biogás. Resíduos mais novos possuem um tempo de conversão menor e maior potencial de geração de metano se comparados a resíduos mais antigos.
- E) pH: a faixa de pH ideal para a maioria das bactérias é de 6,7 a 7,5 (próximo ao neutro). Dentro dessa faixa, a produção do biogás é maximizada. Com um pH abaixo de 6 ou acima de 8, ou seja, fora da faixa ótima, a produção de metano fica limitada. Uma preocupação durante as fases ácidas do processo biológico é se o pH reduzido irá

mobilizar metais que podem lixiviar para fora do aterro, ou tornar-se tóxico para as bactérias geradoras de gás.

- F) Temperatura: as condições de temperatura em um aterro sanitário influenciam no tipo de bactérias predominantes e no nível de produção de gás. A temperatura ideal para a digestão anaeróbia está entre 29 e 38° para as bactérias mesofílicas, e entre 49 e 70° para as termofílicas. Abaixo de 10°, há uma queda brusca na taxa de geração do gás metano (ENSINAS, 2003). As temperaturas típicas do biogás produzido em aterro variam tipicamente entre 30 e 60°.
- G) Outros fatores: fatores como composição de nutrientes, bactérias, compactação dos resíduos, dimensões do aterro sanitário, operação do aterro sanitário e compactação das camadas de resíduos influenciam na taxa de geração de biogás.

5. GEOFÍSICA

É crescente a necessidade de adaptação da aplicação de técnicas de investigação diretas e indiretas para uso em estudos ambientais. A grande quantidade de compostos sintéticos ou derivados do petróleo a fim de utilização final ou como insumos para outras indústrias. Além disso, faz-se necessária a adaptação devido aos riscos de derrame ou vazamento durante o transporte e manipulação destes compostos, vazamentos ou descartes indevidos de efluentes e resíduos sólidos ou líquidos produzidos durante processos industriais, atividades urbanas e domésticas.

Todas essas atividades fomentam a preocupação de profissionais da área de Geociências a pesquisar procedimentos, avaliar e procurar novas técnicas e soluções que possam minimizar os efeitos adversos que a disposição de resíduos causa ao estar em contato direto com o meio físico. Nesse contexto, os métodos geofísicos se encaixam como procedimentos eficazes de estudos em aterros sanitários.

O aperfeiçoamento das técnicas geofísicas foi decorrente dessas necessidades humanas, a fim de encontrar técnicas que suprissem as demandas de cada época e que, além disso, auxiliassem no manejo dos impactos ambientais. Segundo Telford *et al.* (1990), o aperfeiçoamento das técnicas geofísicas ao longo do último século aconteceu a partir da enorme demanda pelos mais variados tipos de metais e pelo uso do petróleo e seus derivados, que desencadeou o desenvolvimento de diversas técnicas com bastante sensibilidade para detectar e mapear depósitos e estruturas de difícil localização.

De acordo com Telford *et al.* (1990), as técnicas geofísicas permitem avaliar as condições geológicas locais através dos contrastes das propriedades físicas dos materiais de subsuperfície, como condutividade ou resistividade elétrica, permissividade dielétrica, magnetismo, densidade, etc., os quais podem ter como origem as diferenciações litológicas e outras heterogeneidades naturais ou não.

Os campos utilizados em levantamentos geofísicos podem ser os naturais, a exemplo os campos magnéticos ou a gravidade da Terra, mas podem também ser criados artificialmente, como as correntes alternadas que são usadas para gerar campos eletromagnéticos (MILSOM & ERIKSEN, 2011).

5.1 Método da Eletrorresistividade

A Eletrorresistividade é um método geofísico baseado no fenômeno de geração artificial de correntes elétricas, as quais são introduzidas no solo através de dois eletrodos, e a leitura feita na superfície é a diferença de potencial resultante. Assim, desvios do padrão de diferença de potencial esperados do solo homogêneo fornecem informações sobre a forma e as propriedades elétricas das heterogeneidades da subsuperfície (KEAREY *et al.*, 2002).

Sua vantagem reside na simplicidade do instrumental envolvido e na versatilidade de aquisição de dados em pequenas áreas, e na variabilidade do parâmetro físico quando medido em ambiente geológico. Além disso, é vantajoso pela possibilidade de aquisição de dados a baixo custo. Em adição, o método permite gerar produtos 1D, 2D e 3D, os quais fornecem uma melhor avaliação do ambiente (KEAREY *et al.*, 2002; KNÖDEL *et al.*, 2007).

As principais desvantagens associadas ao método são a necessidade de cabos de conexão entre os sensores de leitura e o equipamento, uso de eletrodos não polarizáveis, além da elevada susceptibilidade a ruídos produzidos por sistemas elétricos como transformadores, aterramentos e motores, elementos que podem inviabilizar ensaios em grandes áreas ou em ambiente urbano.

Deste modo, a partir de medições de diferença de potencial (ΔV), o qual é produzido pela passagem da corrente elétrica (I) no subsolo, na superfície, é possível determinar a existência de corpos minerais e reconhecer outras estruturas (TELFORD *et al.*, 1990). Considerando o subsolo como um meio heterogêneo, a resistividade considerada é uma média ponderada de todas as resistividades verdadeiras. Assim, a resistividade aparente (ρ_α), dada em Ohm.m é:

$$\rho_\alpha = K \frac{\Delta V}{I} \quad \Omega.m \quad (\text{Equação 2})$$

Onde o coeficiente K é definido por:

$$K = 2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \quad (\text{Equação 3})$$

Os dispositivos usados para as medidas de resistividade consistem em um sistema de quatro eletrodos, sendo que dois deles, o C_1 e C_2 , são usados para enviar corrente elétrica (I) ao solo, e os outros dois, os eletrodos P_1 e P_2 , são usados para medir a diferença de potencial

(ΔV) entre eles.

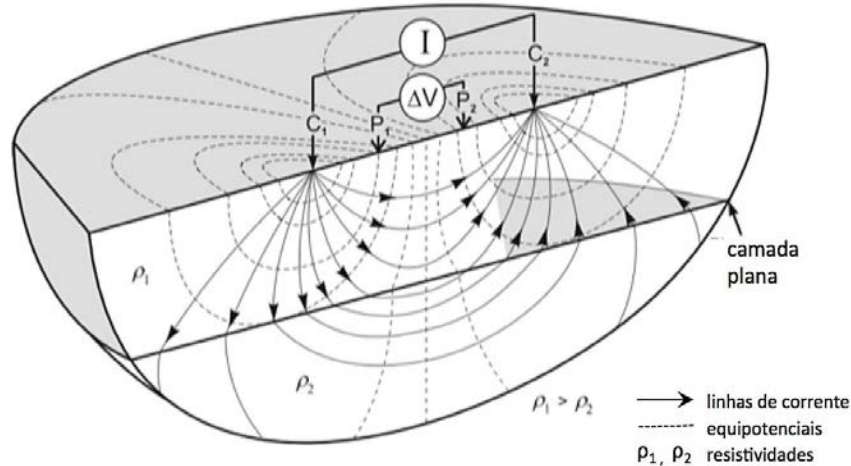


Figura 5: Princípio do método da Eletrorresistividade com um arranjo de quatro eletrodos
Fonte: modificado de Knödel (2007), p. 205

Deste modo, a resistividade elétrica permite a identificação de contrastes em corpos subjacentes à superfície. É possível identificar corpos muito resistivos – que são corpos isolantes, assim como corpos com baixa resistividade – que são os condutores.

5.2 A técnica de tomografia elétrica e o arranjo Schlumberger

A técnica de tomografia elétrica, também conhecida como imageamento elétrico, mede tanto variações laterais como em profundidade da resistividade elétrica. Essa técnica consiste na aquisição de um grande número de medições de resistividade elétrica por meio da escolha do melhor arranjo de eletrodos (BENTLEY & GHARIBI, 2004; MILSOM & ERIKSEN, 2011). Assim, os dados obtidos são processados e tratados, e os resultados são apresentados em forma de imagens bi e tridimensionais de resistividade elétrica (MILSOM & ERIKSEN, 2011).

O arranjo adotado para execução deste trabalho foi o Schlumberger, que é um arranjo amplamente utilizado em estudos ambientais por sua praticidade e qualidade de resultados.

Além de ser mais prático, as leituras estão menos sujeitas a interferências produzidas por ruídos, como por exemplo, potenciais artificiais produzidos por cabos e estações de alta tensão. Além disso, para o estudo em terrenos não homogêneos, como é o caso de aterros sanitários, o arranjo está menos suscetível a erros interpretativos (MILSOM & ERIKSEN, 2011).

O método consiste no alinhamento de uma série de eletrodos, e na seleção de quatro eletrodos para realização de cada medida, dois eletrodos externos (AB) para transmissão de corrente, e dois eletrodos internos (MN) para as leituras de tensão elétrica. Ainda, o espaçamento central é mantido “a” enquanto os outros espaçamentos variam de forma uniforme “b” (Figura 6). Por isso, o espaçamento lateral dos eletrodos de corrente e de tensão permitem leituras laterais em diferentes profundidades no subsolo, o que resulta em um produto bidimensional (MUSSETT & KHAN, 2000).

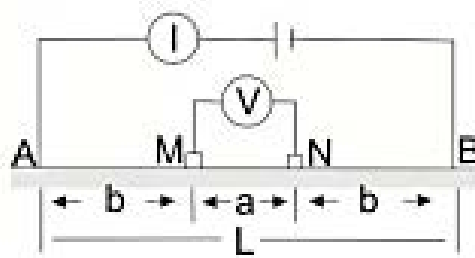


Figura 6: Arranjo eletrodico Schlumberger
Fonte: KNÖDEL *et al.* (2007)

5.3 Aplicações da geofísica em estudos ambientais

A geofísica aplicada a estudos ambientais é a utilização dos métodos geofísicos visando à investigação de alterações físico-químicas nem subsuperfície que causam significantes implicações na manutenção do meio ambiente (GREENHOUSE, 1991).

Bortolin e Malagutti Filho (2010) utilizaram o método da eletrorresistividade para monitorar uma pluma de contaminação no aterro sanitário de Rio Claro (SP), entre os anos de 1999 e 2008. Complementar a esse estudo, foram feitas sondagens elétricas verticais para aferir a profundidade do nível freático e o sentido da pluma de contaminação. Mediante os resultados do imageamento elétrico, zonas de baixa resistividade foram associadas à contaminação por choroume.

Silva, Dourado e Moreira (2011) utilizaram o método geométrico da eletrorresistividade associado às análises químicas, na cidade de Ji-Paraná (RO), para identificar uma pluma de contaminação no aquífero, a qual foi ocasionada pela falta de saneamento básico no município. O estudo se mostrou eficaz, uma vez que as áreas com altas concentrações de íon cloreto e nitrato correspondiam às anomalias de baixa resistividade identificadas.

Moreira, Braga e Fries (2009), com medidas de resistividades elétrica, pH e Eh avaliaram o comportamento geoquímico de resíduos sólidos enterrados no aterro sanitário de Cordeirópolis (SP). O trabalho identificou que os valores baixos de resistividade correspondiam à alta quantidade de sais dissolvidos, que é justificável pelo processo de degradação de matéria orgânica e elevada produção de chorume.

Embora existam muitos estudos que utilizam os métodos geofísicos para análises em aterros sanitários, a maioria deles tem foco na caracterização de áreas com percolação de chorume. São poucos os trabalhos que associam as atividades geoeletricas e os processos físico-químicos que acontecem a todo momento com a degradação da matéria orgânica, através da produção de biogás e de chorume em aterros (GEORGAKI *et al.*, 2008; MOREIRA *et al.*, 2011).

Georgaki *et al.* (2008), para estimar a emissão de gás em superfície, utilizaram a eletrorresistividade como técnica de medição de emissão de gás em um aterro sanitário em Creta, na Grécia. O estudo revelou que o método de eletrorresistividade pode ser utilizado para a estimativa da taxa de emissão de gases em aterros sanitários, pois existe relação entre a fração orgânica do aterro e as emissões de gases. Os valores de resistividade elétrica permitiram determinar a espessura dos resíduos e a presença de chorume ou água.

Moreira *et al.* (2015) utilizam medidas de resistividade associadas a medidas de vazão de biogás em drenos para identificar possíveis relações entre os parâmetros. O trabalho, realizado no aterro sanitário municipal de Rio Claro (SP), indicou que há relação entre geração e acúmulo de biogás, oscilações de resistividade elétrica e variações de pluviosidade.

6. MATERIAIS E MÉTODOS

Durante o mês abril do ano de 2014, foram realizados ensaios de campo no aterro sanitário de Rio Claro (SP) para a coleta de dados de resistividade elétrica. Os dados geofísicos foram comparados com os dados de vazão de biogás obtidos por Gontow (2016), adquiridos no ano de 2014.

Serão explicados, a seguir, os critérios para a seleção da área de estudo e como foi realizada a aquisição e o tratamento dos dados obtidos em campo.

6.1 Seleção da área de estudo no aterro sanitário de Rio Claro

A área escolhida para o levantamento dos dados de eletrorresistividade foi delimitada pela escolha dos drenos de gás. O arranjo das linhas na área de estudo foi feito propositalmente entre os drenos de gás, a fim de que pudesse ser feita a comparação da área de influência dos drenos, ou seja, da vazão do biogás, com os resultados geofísicos.

Os drenos escolhidos foram os de número 25, 26, 27 e 28, que estão localizados em uma região de deposição recente do aterro sanitário que já atingiu a capacidade de recebimento de resíduos. Os drenos de gás foram localizados em uma imagem de satélite do Google Earth, como mostrado nas Figuras 7 e 8, visualizadas abaixo.



Figura 7: Localização dos drenos de gás no aterro sanitário de Rio Claro (SP)
 Fonte: Google Earth (modificado)

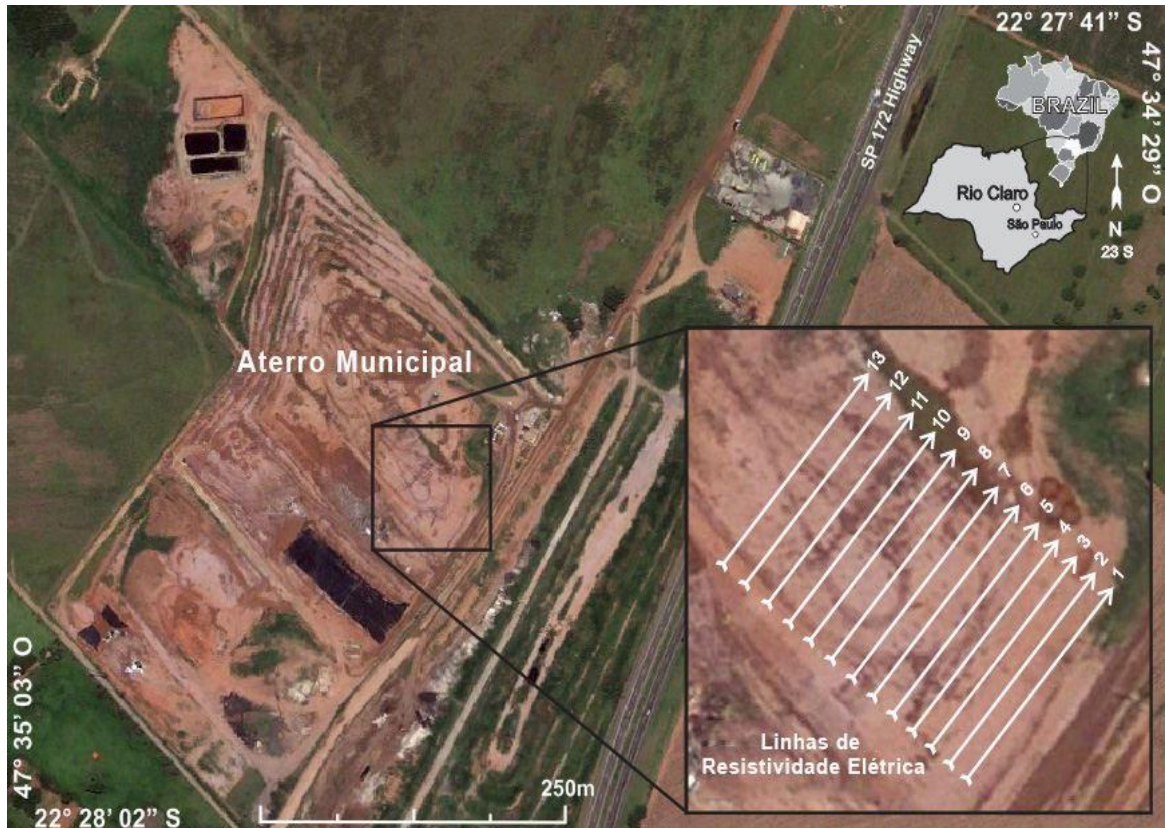


Figura 8: Localização da área de estudos com as 13 linhas de aquisição de dados.

Fonte: Moreira *et al.* (2015)

De acordo com o Plano Municipal de Saneamento Básico (SEPLADEMA, 2014), a região da área de estudo é considerada recente no aterro sanitário, pois teve seu encerramento em meados de 2014. Desse modo, os resíduos localizados na cota topográfica mais alta foram dispostos há poucos anos (aproximadamente 3 anos), e já atingiram a capacidade de recebimento.

A região dos drenos 27 e 28 possui resíduo com idade ligeiramente mais antiga do que a região dos drenos 25 e 26, a qual, durante a fase de aquisições de dados (abril/2014), ainda tinha as imediações cobertas e compactadas com solo e sedimentos.

Assim, os resíduos na região escolhida para o presente estudo pode ser considerado como recente, pois, durante a aquisição de dados, a área estava próxima à sua fase de encerramento

6.2 Aquisição e tratamento de dados

As aquisições dos dados geofísicos foram realizadas pelo levantamento de medidas de resistividade elétrica ao longo de 13 linhas distantes cinco metros entre si, as quais totalizaram o mapeamento de uma área de 60m x 60m.

Para tanto, foi utilizada a técnica de tomografia elétrica, para leitura do parâmetro de resistividade elétrica, na qual foi adotado o arranjo Schlumberger, com 42 eletrodos preenchidos com solução cúprica (sulfato de cobre), ao longo de cada linha de 60m, com espaçamento de 1,5m entre cada eletrodo (Figura 9).

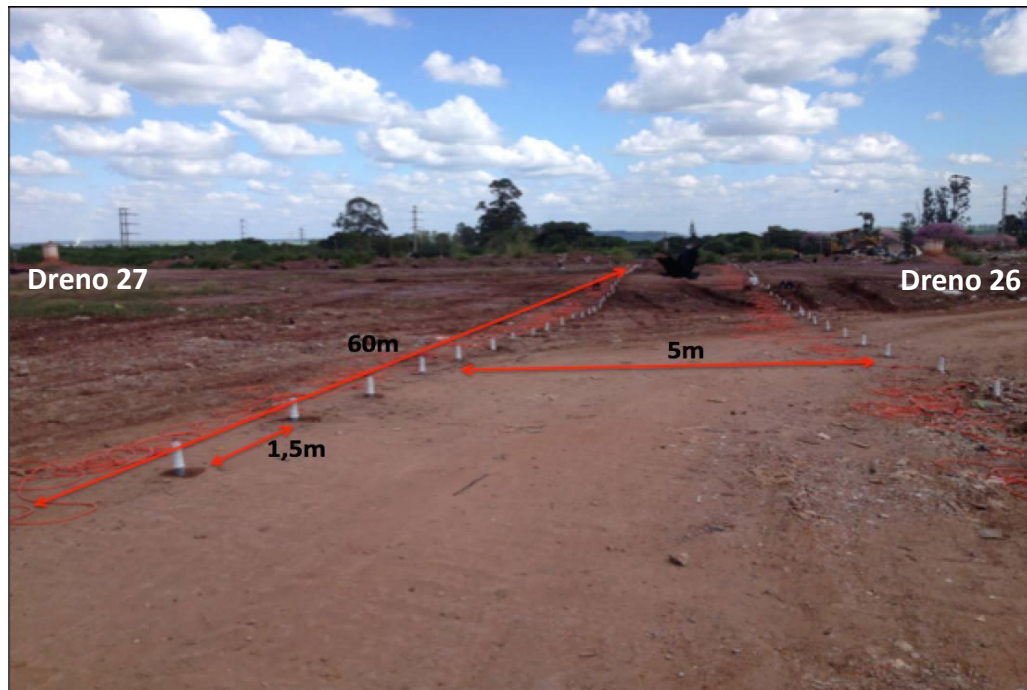


Figura 9: Espaçamento das linhas de análise entre dois drenos no aterro sanitário de Rio Claro (SP).
Fonte: autor

Cada eletrodo foi conectado ao resistivímetro por um conjunto de cabos elétricos, que estava acoplado ao equipamento geofísico Terrameter LS, fabricado pela ABEM (Suécia) calibrado para injeção de 60mA (Figuras 10 A e B).

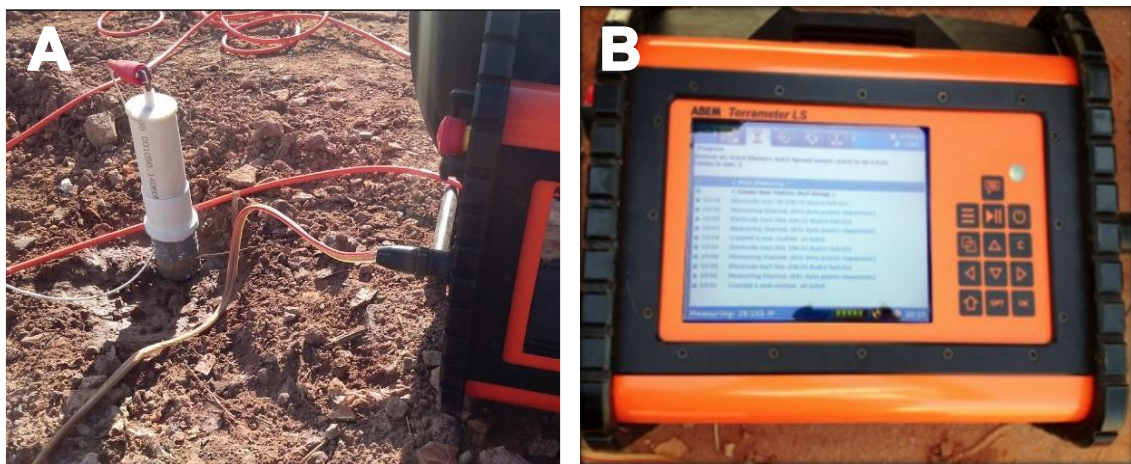


Figura 10: Equipamentos utilizados para aquisição dos dados geofísicos. A) Eletrodos e conjunto de cabos. B) Resistivímetro Terrameter LS.
Fonte: Autor

Os eletrodos utilizados foram do tipo porosos, saturados com CuSO_4 . O pote de cerâmica, por ser poroso, permite que a solução cúprica entre em contato com o solo erradicando o fenômeno de polarização entre este e o solo, o que, normalmente, induz a erros nas leituras do potencial analisado, como acontece quando o eletrodo metálico é utilizado (BRAGA, 2006).

Os dados geoeletricos obtidos em campo foram processados pelo *software* de modelagem RES2DINV, que realiza inversão 2D dos dados. A inversão é realizada com base no método dos mínimos quadrados, com suavização restringida (*smoothness- constrained least-square*) (LOKE & BARKER, 1996).

O *software* utiliza uma técnica rápida e eficiente para a inversão dos dados. Assim, teoricamente, o modelo geoeletrico gerado fica isento de distorções da seção de resistividade aparente, a qual é originada pela geometria do arranjo utilizado.

A inversão consiste na divisão da subsuperfície em um número de pequenos prismas retangulares para realizar as medidas de resistividade, a fim de reduzir a diferença dos valores de resistividade aparente, os quais são obtidos em campo. Essa diferença, entre os valores de resistividade do modelo de blocos, é expressa pelo erro RMS (*Root Mean Square*) (GEOTOMO, 2003).

Os dados gerados para inversão 2D foram reunidos em um único arquivo e usados para a geração de pseudomodelos 3D e mapas de profundidade. Este processo foi realizado na plataforma Oasis Montaj, na qual os dados 2D obtidos no programa RES2DINV foram interpolados e modelados para o realce de valores extremos em um modelo de blocos de pseudo-3D, em cujas linhas de tomografia elétrica foram posicionadas.

Para a comparação com os dados de vazão de biogás nos drenos selecionados, foi utilizado o equipamento termo-anemômetro digital portátil, da marca TESTO, modelo 405-V1, com precisão de 5%. O equipamento possui um sensor de velocidade, o qual é um fio preciso e com rápido tempo de resposta (HIGHMED, 2016).



Figura 11: Termo-anemômetro digital portátil TESTO, modelo 405-V1

Fonte: Antonio (2012)

7. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados de vazão do biogás para os drenos 25, 26, 27 e 28, no ano de 2014, estão apresentados na Tabela 2:

Tabela 2: Dados de vazão do biogás (em m³/h) nos drenos 25, 26, 27 e 28

Data	Vazão dreno 25 (m ³ /h)	Vazão dreno 26 (m ³ /h)	Vazão dreno 27 (m ³ /h)	Vazão dreno 28 (m ³ /h)
28/04/14	34,21	46,72	35,22	31,52
15/05/14	29,34	44,40	37,96	32,59
29/05/14	29,50	51,05	32,47	29,48
09/06/14	28,65	43,42	31,76	25,56
03/07/14	22,11	41,26	36,01	26,08
16/07/14	30,07	52,73	13,16	20,05
20/08/14	29,15	44,66	34,11	22,88
10/09/14	31,26	46,08	45,13	28,03
23/09/14	31,71	42,33	42,21	26,68
08/10/14	27,93	43,97	32,28	30,93
29/10/14	31,24	63,42	47,32	26,79
01/12/14	29,19	47,82	42,88	28,55

Fonte: adaptado de Gontow (2016)

Os dados de resistividade elétrica foram processados no *software* RES2DINV resultaram em seções de resistividade expressas em termos de distância x profundidade, com escala logarítmica e intervalos de interpolação com valores em cores. As imagens a seguir são referentes às 13 linhas de tomografia elétrica, e apresentam uma profundidade máxima de 9,1m (Figuras 12,13 e 14).

A interpolação dos dados 2D, obtidos no *software* RES2DINV, foram unidos em um único arquivo, do *software* Oasis Montaj, o que permitiu a geração de uma visualização em 3D dos dados geofísicos e suas relações com o fluxo de biogás nos drenos (Figuras 15, 16 e 17). Cabe ressaltar que a profundidade de 9,1m, do modelo 2D, foi mantida.

Os resultados obtidos nos modelos de inversão possuem a mesma escala de valores e cores, para que seja possível uma análise comparativa entre os resultados obtidos. As cores frias na escala correspondem a baixa resistividade e as cores quentes a alta resistividade elétrica.

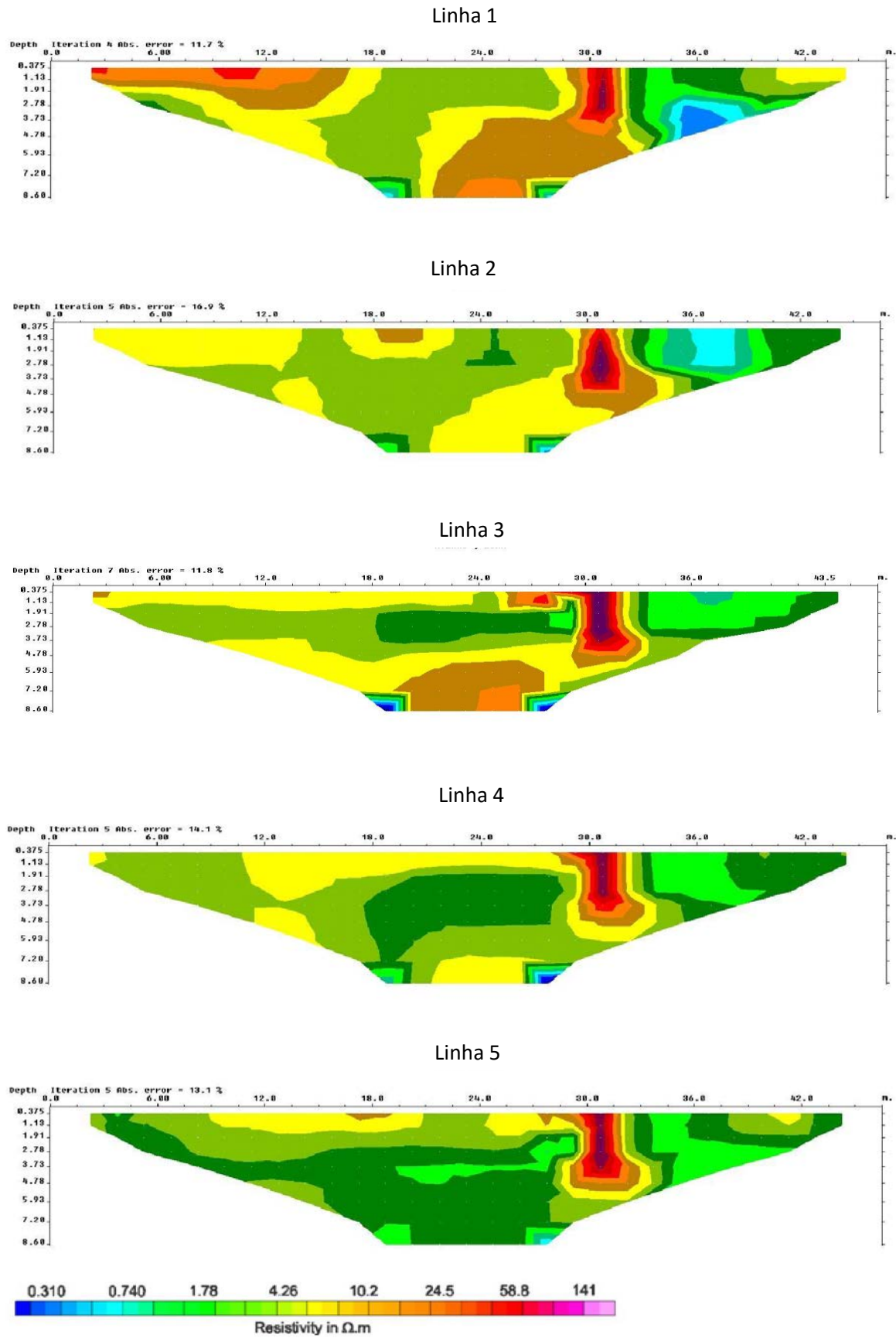


Figura 12: Modelo obtido por inversão das resistividades aparentes das linhas 1 a 5.

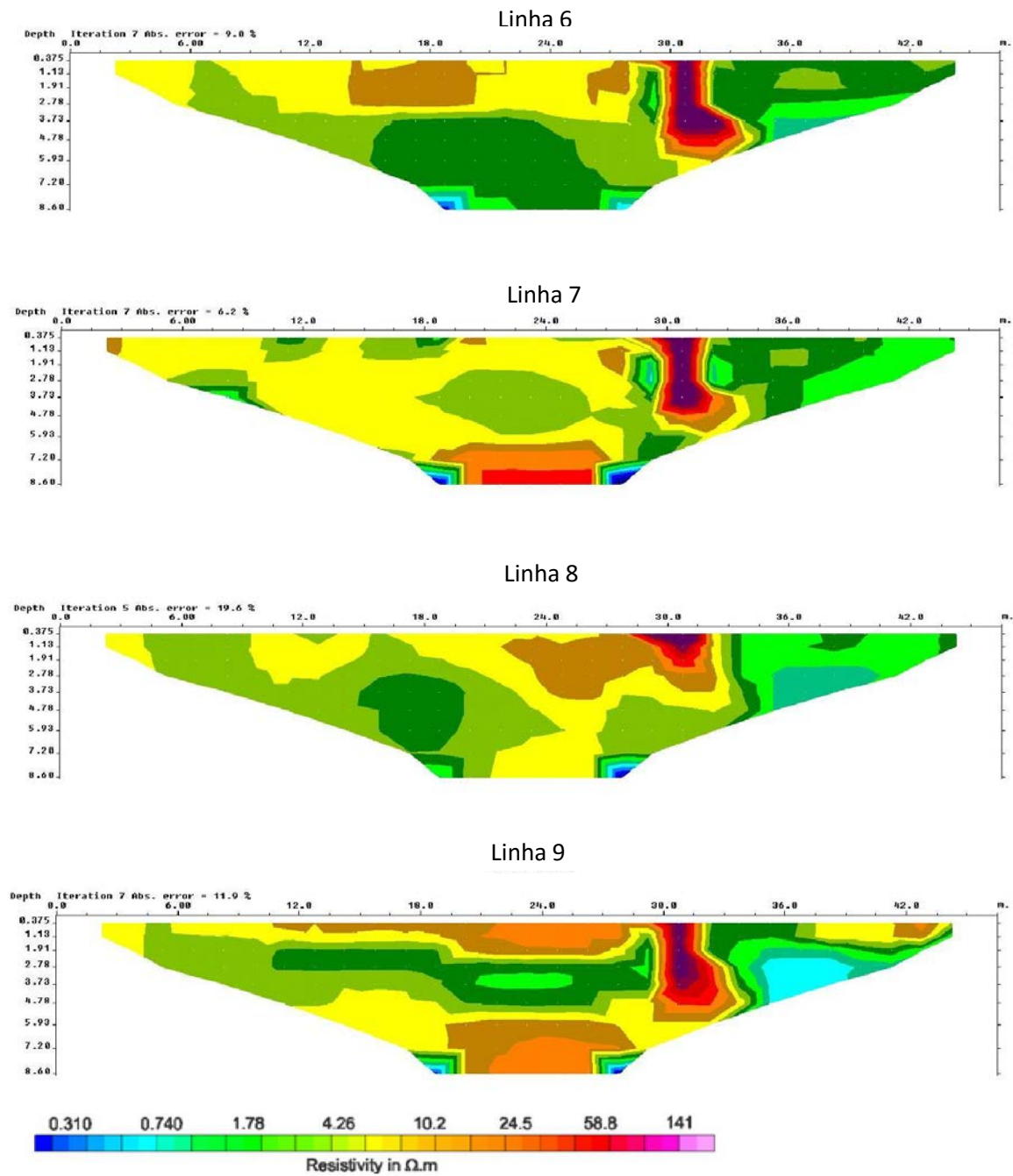


Figura 13: Modelo obtido por inversão das resistividades aparentes das linhas 6 a 9.

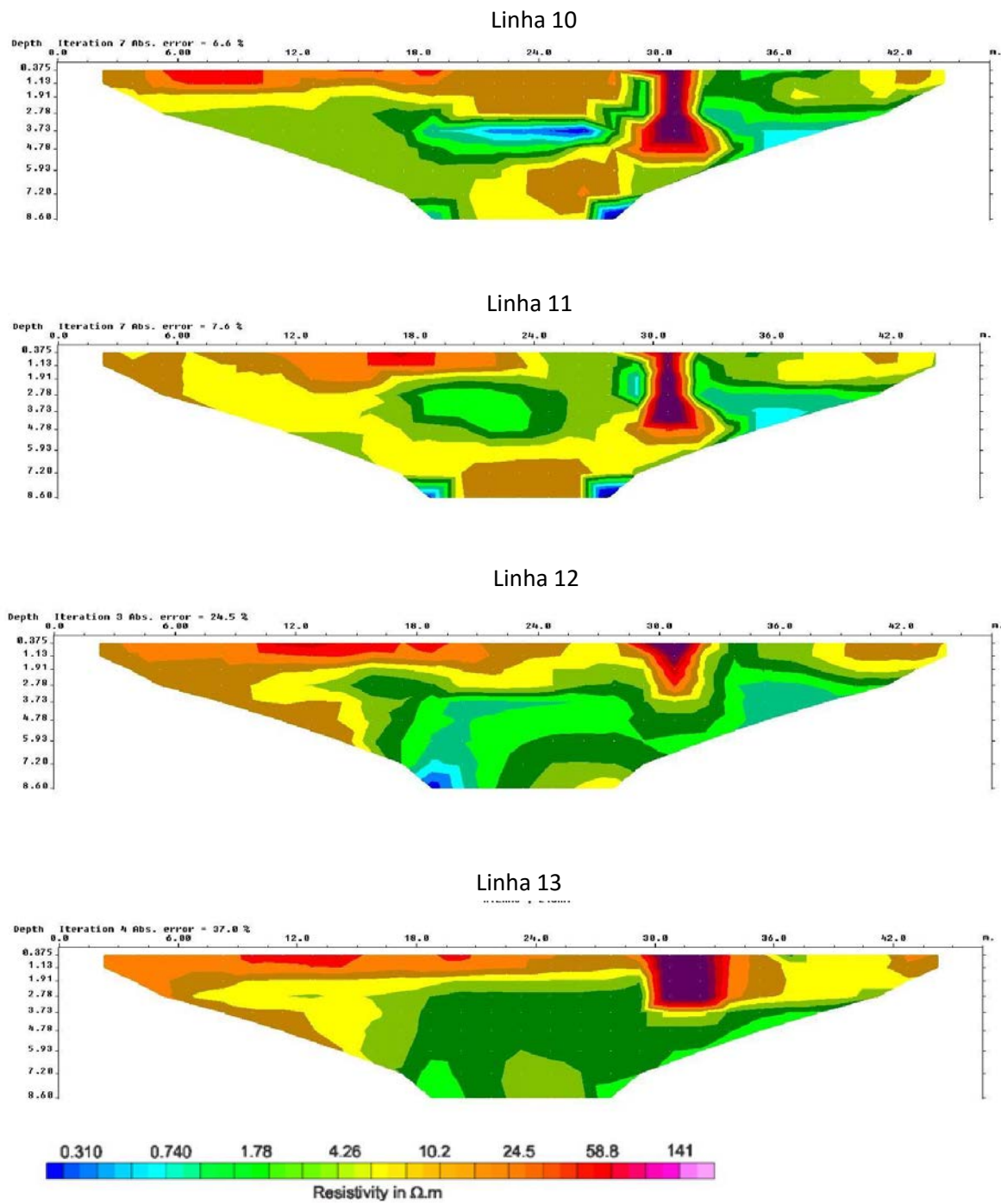


Figura 14: Modelo obtido por inversão das resistividades aparentes das linhas 10 a 13.

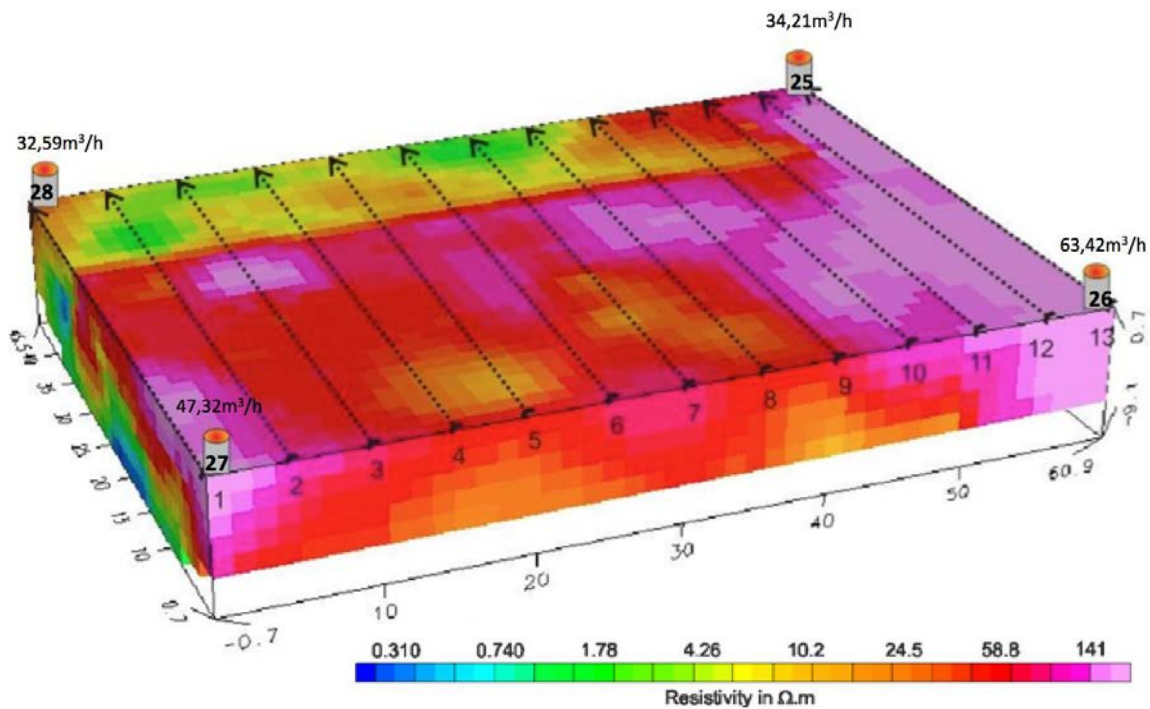


Figura 15: Modelo de visualização 3D de resistividade elétrica, com o posicionamento das linhas de tomografia elétrica dos drenos de biogás e das respectivas vazões (em m^3/h)

É possível notar, a partir dos dados de vazão, que os drenos 25 e 28 apresentam menor vazão de biogás, quando comparados com os fluxos observados nos drenos 26 e 27. A variação no fluxo dos drenos pode ser atribuída ao posicionamento destes em diferentes áreas, além da variação temporal da deposição dos resíduos.

A rotina de deposição em aterros consiste na liberação dos resíduos na vala, em operação por caminhões, e seguinte compactação, por tratores compressores, com uma camada de terra de escavação. Este processo visa racionalizar o espaço disponível para armazenamento de resíduos e minimizar o tempo de contato entre o resíduo e o ar.

Os sucessivos níveis, que são criados com a rotina de aterramento dos dejetos, aumentam a compactação dos resíduos mais antigos e inferem na redução da porosidade, também ocasionada pelos processos de consumo da matéria orgânica, os quais são convertidos em gases e percolados (MOREIRA *et al.*, 2014).

Desse modo, a ocorrência de baixas vazões de biogás em drenos pode ser justificada devido a menor disponibilidade de matéria orgânica sujeita à decomposição, gerada pela fuga de gases, a qual é causada pelo rearranjo de resíduos no solo, fraturas, alterações de umidade sazonais, entre outros fatores, tais como os descritos por Brito Filho (1995) e Borba (2006).

Contrastando às baixas vazões, as altas vazões nos drenos 26 e 27 possivelmente ocorrem devido à predominância da fase metanogênica da decomposição da matéria orgânica. Segundo a proposta de Tchobanoglous *et al.* (1993), é atingido, nesta fase, o pico de produção do biogás (70% da produção), decorrente do consumo dos nutrientes disponibilizados na matéria orgânica.

A variação nas leituras de vazão do biogás é notada nas áreas de influência dos drenos, visto que os altos valores de resistividade elétrica são esperados para áreas com maior acúmulo ou fluxo de gases, motivada pelo caráter isolante dos gases para a passagem de corrente elétrica. Em contrapartida, há a predominância de baixos valores de resistividade nas regiões dos drenos com baixo fluxo de biogás.

A análise do produto em 3D, em diferentes posições espaciais, corrobora para uma análise mais detalhada sobre os dados de resistividade em diferentes profundidades e suas relações com o fluxo de biogás nos drenos analisados.

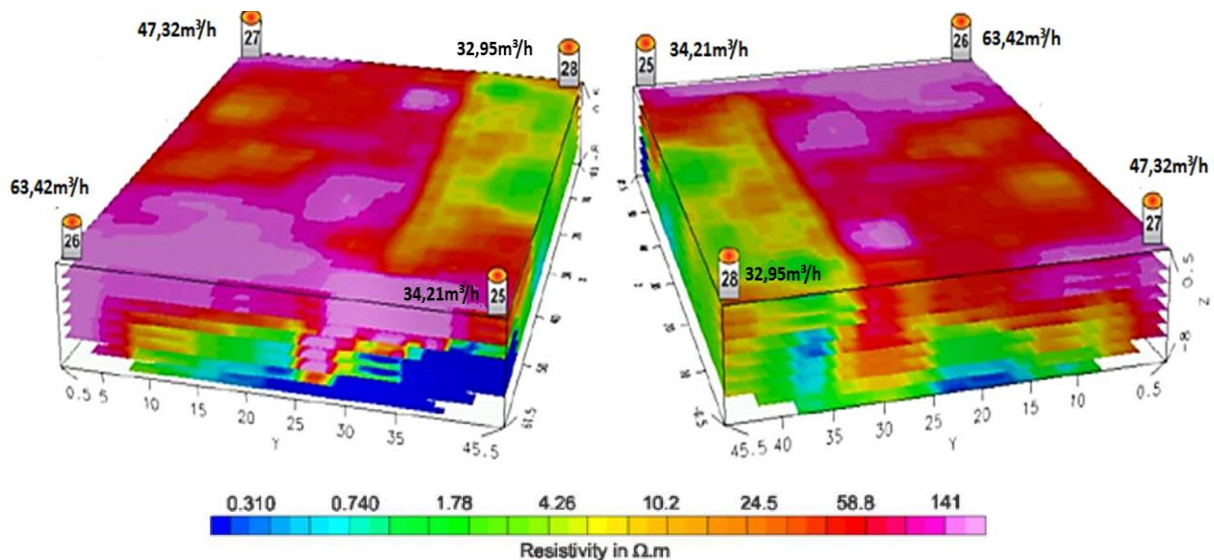


Figura 16: Modelo de visualização 3D de resistividade elétrica, com o posicionamento dos drenos de biogás e das respectivas vazões (em m³/h)

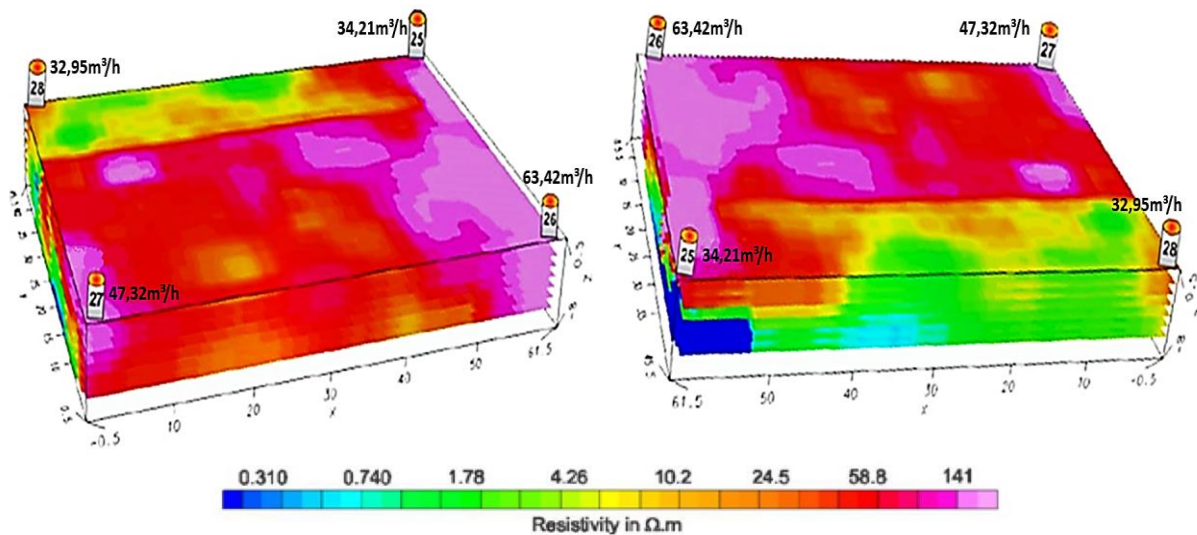


Figura 17: Modelo de visualização 3D de resistividade elétrica, com o posicionamento dos drenos de biogás e das respectivas vazões (em m^3/h)

O bloco em 3D revela áreas de alta resistividade ($141\Omega.m$) entre os drenos 26 e 27, mais especificamente localizadas entre as linhas 1 e 13. A região entre os drenos 25 e 28, limitada por uma faixa entre as linhas 1 e 11, é caracterizada por valores de baixa resistividade ($24,5\Omega.m$) (Figura 15).

O dreno 26 apresenta os mais altos fluxos de biogás da área de estudo ($63,42\text{ m}^3/\text{h}$), sendo os valores de resistividade, em sua área de influência, caracterizados por apresentar elevada resistividade ($141\Omega.m$) ao longo de todos os $9,1\text{m}$ de profundidade (Figura 17).

O dreno 27, também caracterizado por altos fluxos de biogás ($47,32\text{m}^3/\text{h}$), em semelhança ao dreno 26, também possui altos valores de resistividade ao longo da profundidade e da área de influência, com alta resistividade até 7m de profundidade ($141\Omega.m$) e um decaimento gradual, abaixo dessa profundidade, até atingir valores próximos a $58\Omega.m$.

Em contraste com os altos valores de fluxo de biogás, o dreno 28 apresenta o menor fluxo ($32,59\text{m}^3/\text{h}$), assim como a área de influência deste dreno apresenta grande variação em valores de resistividade. O dreno 25, em semelhança ao dreno 28, apresenta baixos valores de fluxo de biogás ($34,21\text{m}^3/\text{h}$), com grandes variações de resistividade a partir do aumento da profundidade.

A região que compreende as imediações do dreno 25 mostrou altos valores de resistividade até os primeiros 2m de profundidade ($141\Omega.m$). Tais valores caem bruscamente a

partir dos 4m de profundidade ($0,3\Omega.m$). Algo semelhante ocorre em profundidade com o dreno 28: os primeiros 3m de profundidade são caracterizados por valores que variam de $24\Omega.m$ e $10\Omega.m$, com redução gradual da resistividade até atingir valores próximos a $1,78\Omega.m$.

A análise comparativa entre os dados de vazão de biogás nos drenos e os valores de resistividade elétrica nas respectivas áreas de influência apontam uma correlação entre zonas de alta resistividade ($141\Omega.m$) e drenos que possuem maiores fluxos de biogás. Em contrapartida, as regiões com baixos valores de resistividade elétrica correspondem à área de influência dos drenos com baixos fluxos de biogás.

Neste sentido, as áreas com altos valores de resistividade caracterizam zonas com acúmulo de biogás, as quais prevalecem acomodadas nos espaços vazios da massa de resíduos. Em contraste com os altos valores de resistividade elétrica, a elevada quantidade de lixiviados e umidade e de sais dissolvidos na subsuperfície refletem os baixos valores de resistividade elétrica.

8. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos indicam que o parâmetro físico medido – resistividade elétrica – é sensível aos produtos da degradação da matéria orgânica em aterro sanitário, e possibilitou relacionar a produção de biogás, na área de estudo, com a vazão de gás nos drenos analisados.

A existência de zonas de alta resistividade, ao longo de toda profundidade (141 Ω .m), na área de influência em tornos dos drenos, é notada em superfície com altos fluxos de biogás (63,42 m³/h), devido ao caráter isolante do gás. Drenos com baixo fluxo de biogás (32,59m³/h) apresentam baixos valores de resistividade (1,78 Ω .m), sendo associados ao processo de degradação da matéria orgânica com a produção de lixiviados.

As condições de assentamento do resíduo, de compactação, e a grande heterogeneidade do material depositado nas valas são fatores que exercem enorme influência no consumo da matéria orgânica e no rearranjo do resíduo. Tais condições, associadas a constantes alterações sazonais, corroboram para emissões evasivas de biogás, e possível acúmulo do gás em diferentes áreas, o que causa interferência nos resultados elevados de resistividade e extinção de outras áreas de acúmulo (METCALFE & FARQUHAR, 1987).

Apesar de serem escassos os trabalhos que tratam sobre esse tema, os resultados deste sugerem a viabilidade da utilização do método eletrorresistividade, em conjunto com a análise e a comparação das taxas de fluxo do biogás nos drenos, como uma ferramenta para a investigação de locais com acúmulo de biogás em aterros sanitários.

O método permite o monitoramento e a análise da mudança de fluxos do biogás em subsuperfície, assim como a localização de potenciais pontos para instalação de drenos para captação de biogás.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS **Classificação do gás proveniente de aterro sanitário**. 7p. Disponível em: <file:///Users/thamunhoz/Downloads/NotaConj_2007.pdf>. Acesso em fevereiro de 2014 , 2007

ANTONIO, S. M. **Análise da variação da vazão e da concentração do metano presentes nos gases gerados no aterro sanitário de Rio Claro – SP**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP. Rio Claro, São Paulo, 2012.

ASQUITH, G.B. & GIBSON, C.R. Basic Well Log Analysis for Geologists. American Association of Petroleum Geologists, Oklahoma, p. 234, 1982

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2011**. São Paulo: 2012. Disponível em <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2011.pdf>>. Acesso em março de 2014

BENTLEY, L. R.; GHARIBI. **Two and Three-dimensional Electrical Resistivity Imaging at a Heterogeneous Remediation Site**. Geophysics. Vol. 69 n.3, p. 674-680, 2004

BILITEWSKI, B.; HARDTLE, G.; MAREK, K Waste Management. Springer –Verlag Science & Business Media: Berlin, Heidelberg, Germany. 231-234p, 1997.

BORBA, S. M. **Análises de modelos de geração de gases em aterros sanitários: estudos de caso Rio de Janeiro**. Dissertação de Mestrado . Rio de Janeiro: COOPE/UFRJ, 2006.

BORTOLIN, J. R. M.; MALAGUETTI FILHO, W. **Método da eletrorresistividade aplicado no monitoramento temporal da pluma de contaminação em área de disposição de resíduos sólidos urbanos**. Engenharia Sanitária e Ambiental, p. 367-374, 2010.

BRAGA, A. C. O. **Métodos da eletrorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: uma abordagem**

metodológica e prática. 2006. ii, 121 f. Tese (livre-docência) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2006.

BRITO FILHO, L. F. **Estudo de gases em aterros de resíduos sólidos urbanos.** 218 p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.

CASTRO, M. C. A. A. **Avaliação de um Sistema Australiano de Lagoas no Tratamento conjunto de esgoto Sanitário e líquidos percolados gerados em Aterro Sanitário.** São Carlos. Dissertação (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos- EESC, Universidade de São Paulo – USP, 2001

CETESB – Companhia De Tecnologia de Saneamento Ambiental. Pesquisa sobre emissões de metano dos depósitos de lixo no Brasil. São Paulo, 1999. Disponível em <<http://cetesb.sp.gov.br/metano/emissoes/Aterro%20SanitC3/A1/21>> Acesso em Abril de 2014

CETESB – Companhia De Tecnologia de Saneamento Ambiental. Biogás: Pesquisas e Projetos no Brasil. São Paulo, 2006. Disponível em <<http://cetesb.sp.gov.br/saneamento-ambiental/pesquisas-e-projetos-2006/publicacoes>> Acesso em Abril de 2014

CETESB – Companhia De Tecnologia de Saneamento Ambiental. Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Urbano. São Paulo, 2014. Disponível em <<http://cetesb.sp.gov.br/saneamento-ambiental/residuos-solidos-urbano.pdf>> Acesso em Abril de 2014.

D'ALMEIDA, Maria Luiza Otero, VILHENA, André. Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado. São Paulo: IPT/CEMPRE, 2000.

ENSINAS, A. V . **Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas.** Campinas: Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas (Dissertação de Mestrado). Faculdade de Engenharia Mecânica, 2003.

GEORGAKI, I.; SOUPIOS, P.; SACAS, 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.** *Sci Total Environ*, Vol. 389, pp. 522–531, 2008

GEORGAKI, I.; SOUPIOS, P.; SACAS, 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.** *Sci Total Environ*, Vol. 389, pp. 522–531, 2009

GEOTOMO. 2003. **RES2DINV Version 3.53 for Windows 98/ME/2000/NT/XP.** Rapid 2D resistivity and IP inversion using the least-squares methods. User's Manual, 129p.

GONTOW, A. **Ajuste de modelos matemáticos de previsão de geração de metano para análise de viabilidade econômica do aproveitamento energético do biogás gerado no aterro municipal.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP. Rio Claro, São Paulo, 2016.

GREENHOUSE, J.P. **Environmental geophysics: it's about time.** *Geophysics: The Leading Edge*, vol. 10 n. 1 p. 32 – 34, 1991

HIGHMED, **Soluções em Tecnologia de Medição**, 2016. Disponível em <<http://www.highmed.com.br/testo-405-v1-anem%C3%B4metro>> Acesso em: 30 de abril de 2016

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008. 219 p. (Departamento de População e Indicadores Sociais). Rio de Janeiro: 2010. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb2008/PNSB_2008.pdf>. Acesso em: abril de 2014

ICLEY-Brasil, 2009. Manual para Aproveitamento de Biogás – Volume I Aterros Sanitários. ICLEY-EPA, p. 80

IPT- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo. São Paulo, (IPT, Série Monografias), 1981.

KEAREY, P. 2002. Geofísica de exploração (tradução de Maria Cristina Moreira Coelho). Oficina de Textos, 429p.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **An Introduction to Geophysical Exploration**. 3rd edition, Cambridge University Press, United Kingdom.

KNÖDEL, K.; LANGE, G.; VOIGT, H. J. **Environmental Geology: Handbook of Field Methods and Case Studies**. Berlin: Springer-Verlag, 2007, 1374p.

LEITE, L. E. H. B. C., MAHLER, C. F., BRITO FILHO, L. F. **Avaliação do potencial de recitas derivadas do biogás de aterros**. 23^o Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005

LOKE, M. H.; BARKER, R. D. **Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion**, *Geophys. Prospect.*, vol. 44, p. 499 – 523, 1996

LOKE, M. H. **Rapid resistivity inversion using the least-squares method, RES2DINV Program manual**. Penang Malaysia, 1997.

METCALFE, D. E., FARQUHAR, G. J. **Modeling gas migration through unsaturated soils from waste disposal sites**. *Water Air Soil Pollution*. Vol. 32, p. 247-259, 1987

MILSON, J.; ERIKSEN, A. **Field Geophysics**. 4th edition, John Wiley & Sons, Ltd, p.297, 2011

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, p. 129, 1973

MOREIRA, C. A., BRAGA, A. C. O., FRIES, M. **Degradação de Resíduos e alterações na resistividade elétrica, pH e Eh.** Revista Brasileira de Geofísica vol. 27, n. 2, p. 283-293, Abril/Junho 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 vol. 41, n. 3, p. 549- 557, Setembro 2001.

MOREIRA, C., CASTRO, M. A., GONSALEZ A. C., CAVALLARI, F., MUNHOZ, T., PEREIRA A. **Comparative Analysis between Biogas Flow in Landfill and Electrical Resistivity Tomography in Rio Claro City, Brazil.** Journal of Geological Research, Article ID 845906, 2014

MOREIRA, C., CASTRO, M. A., CARRAZA, L.P., CAVALLARI, F., HELENE, L.P.I., MACHADO, F.B., 2015, **Relationship between biogas production and variations in electric resistivity in landfill of Rio Claro city, Brazil.** Revista Brasileira de Geofísica vol. 33, n. 2, p. 218-224, 2015

MOREIRA, C. A., MUNHOZ, T., CAVALLARI, F., HELENE, L.P.I. **Electrical Resistivity to detect zones of biogas accumulation in a landfill.** Geofísica Internacional. Vol. 54, n. 4, p.353-362. Agosto/Outubro 2015

MUSSET, A. E.; KHAN, M. A., 2000. Looking into the Earth: An Introduction to Geological Geophysics. Cambridge (Cambridge University Press), p. 461

ORELLANA, E. 1972. Prospeccion geoelectrica em corriente continua. Madrid, Ed.Paraninfo, Biblioteca Técnica Philip, p. 523

ORELLANA, E. 1974. Prospeccion geoelectrica por campos variables. Madrid, Ed.Paraninfo, Biblioteca Técnica Philip, p. 571.

PELCZAR, M. J.; CHAN, E. C. S.; KRIEG, N.R. **Microbiologia: conceitos e aplicações.** 2 ed. São Paulo: Pearson Education of Brasil. p.517, 1997.

PRADO, H.; OLIVEIRA, J. B.; ALMEIDA, C. L. F. **Levantamento pedológico semidetalhado do Estado de São Paulo. Quadrícula de São Carlos.** Instituto Agrônomo de Campinas, 1981.

RAP – Relatório Ambiental Prelimina. **Aterro sanitário e industrial do município de Rio Claro – SP.** Ação engenharia. São Paulo – SP.

REYNOLDS, J.M. 1997. An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. John Wiley & Sons Ltd., p. 794

SEPLADEMA- Secretaria Municipal de Planejamento, Desenvolvimento e Meio Ambiente de Rio Claro. Plano municipal de saneamento básico do município de Rio Claro. Rio Claro. 2014.

SILVA, A.C., DOURADO, J.C, MOREIRA, C.A. **Aplicação da eletrorresistividade na caracterização do meio hidrogeológico na cidade de JI- PARANA (RO).** Geociências, São Paulo. Vol. 30, n. 4, p. 641-650, 2011

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL S. Integrated solid waste management: engineering principles and management issues. USA: McGraw-Hill, p. 978., 1993

TELFORD, W.M.; GELDART, L.P.; SHERIFF, R.E. Applied geophysics. 2nd edition, Cambridge University Press, Cambridge, 9. 729, 1990

ZAINE, J. E. **Geologia da Formação Rio Claro na folha Rio Claro (SP).** Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências e Ciências Exatas – IGCE. Universidade Estadual Paulista – UNESP. p.99. Rio Claro, 1994

