

Trabalho de Formatura

Curso de Graduação em Geologia

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE A PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM ATERRO
CONTROLADO E VARIAÇÕES NO POTENCIAL ELÉTRICO NATURAL POR MEIO
DE PERFILAGEM GEOFÍSICA**

Luis Fernando de Barros Reicao Cordido

Prof.Dr. César Augusto Moreira

Rio Claro (SP)

2013

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

LUIS FERNANDO DE BARROS REICAO CORDIDO

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE A PRODUÇÃO DE
BIOGÁS EM ATERRO CONTROLADO E VARIAÇÕES NO
POTENCIAL ELÉTRICO NATURAL POR MEIO DE
PERFILAGEM GEOFÍSICA

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 Geólogo.

Rio Claro - SP

2013

551 Córdido, Luis Fernando de Barros Reicao
C795a Análise comparativa entre a produção de biogás em aterro controlado e variações no potencial elétrico natural por meio de perfuração geofísica / Luis Fernando de Barros Reicao Córdido. - Rio Claro, 2013
45 f. : il., figs., gráfs., tabs., fots. + 1 DVD

Trabalho de conclusão de curso (bacharelado - Geologia) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Orientador: César Augusto Moreira

1. Geofísica. 2. Potencial espontâneo. 3. Ambiental. 4. Monitoramento. 5. Resíduo. I. Título.

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

LUIS FERNANDO DE BARROS REICAO CORDIDO

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE A PRODUÇÃO DE
BIOGÁS EM ATERRO CONTROLADO E VARIAÇÕES NO
POTENCIAL ELÉTRICO NATURAL POR MEIO DE
PERFILAGEM GEOFÍSICA

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 Geólogo.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. César Augusto Moreira (orientador)

Prof. Dr. Antonio Celso de Oliveira Braga

Prof.Dr. Marcus César Avezum Alves de Castro

Rio Claro, 2 de Julho de 2013.

Assinatura do(a) aluno(a)

assinatura do(a) orientador(a)

Aos meus pais, irmãos e a frida.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de iniciar meus agradecimentos, para as pessoas mais importantes na minha vida meu Pai, minha Mãe, meus Irmãos, minha Tia Solange, meu Tio Paulo, a Frida e a minha Avó, que seja onde estiver ela estaria muito orgulhosa de mim. Quero dizer que sou eternamente grato a todos, pois sempre estiveram ao meu lado, desde sempre, e nunca me abandonaram principalmente nas horas mais difíceis da minha vida e assim dedico muito este trabalho a todos eles.

Quero agradecer também em especial ao meu orientador, que se tornou um amigo com o passar do tempo, o Prof. Dr. César Augusto Moreira por todo apoio, dedicação, paciência, broncas e puxões de orelha, pois sei que foi sempre por uma boa causa.

Agradecer muito aos meus poucos, mas verdadeiros amigos de São Paulo, que também sempre estiveram comigo nessa jornada, mesmo estando longe. Muito obrigado, Yuri, Monise, André, Mayumi, Pai Mei, Lilian, Marcelinho, vocês são minha segunda família, hahahahaha!

Um agradecimento muito especial a todos os amigos e colegas da minha turma Geovársea, por momentos de risadas em campo, “ajuda” nos estudos, a Camila Coelho por seus cadernos milagrosos e amizade, ao Maisena e a Dani por bons conselhos em tempos ruins, e pela sincera amizade, ao Kiko por ser um grande amigo e suas zueiras, ao Bolacha por ser um grande amigo e estar sempre animando a galera, ao meu grande amigo Buraco que no momento mais difícil da minha vida estava me ajudando, mesmo com Campo II ferrando a gente, ao meu amigo Salsixa que sempre proporcionou altas risadas, ao Wagner e Caju pela amizade sincera e a todos os outros amigos da geovársea que não citei mas que agradeço do fundo do meu coração e dedico também este trabalho a eles.

Quero agradecer aos novos amigos da turma Alcool’geo/Carboneiro que me acolheram como um amigo e também proporcionaram grandes risadas, meu amigo Bussa, Paulão, Igor, Melado, Zé, Fruta, Hulk e a todos os outros, muito obrigado.

Quero agradecer ao meu grande amigo Julião que me ensinou muito sobre música e que acabou me levando ao samba, com a Bateria Porcaria.

Ao meu amigo Pedro Camarero (Fezes), por me ajudar muito no trabalho, fazendo furos a trado manual, pelas risadas e zueiras juntos.

Aos meus grandes amigos quero deixar um agradecimento muito especial, por tudo que eles representam, pelos conselhos, conversas, parcerias e sincera amizade, muito obrigado Alemão e Xorume.

E por fim quero aqui deixar um agradecimento muito especial aos meus amigos de república Drausio, Aspira, Bixão (Simba), Edílson, Wellington.

*“Let the good times roll,
Let the good times roll,
I don't care if you're young or old
Get together, let the good times roll”*

(B.B.King)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVO.....	13
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1	Biodegradação e Aterro Sanitário	14
3.2	Local De Estudo	16
	Fonte: Do Autor	18
3.3	Geologia.....	19
3.2.1	Geologia Regional.....	19
3.2.2	Geologia Local.....	22
3.3	Revisão de Trabalhos Anteriores.....	24
4	MÉTODO E ETAPAS DE TRABALHO	27
4.1	Método do Potencial Espontâneo.....	27
4.2	Aquisição e Processamento de dados.....	30
4.2.1	Instalação de Equipamento e Coleta de Dados.....	30
4.2.2	Processamento de Dados	33
5	RESULTADOS.....	35
6	CONCLUSÃO	42
	REFERÊNCIAS.....	43

LISTA DE FIGURA

Figura 1 - Localização da área de instalação do dispositivo de monitoramento e o retângulo branco indica a localização da vala.	17
Figura 2 - Etapas de operação do aterro: (A) Abertura de vala; (B) Descarga de resíduos; (C) Lançamento e cobertura dos resíduos; (D) Valas finalizadas.....	18
Figura 3 – (A) Desenho esquemático da vala; (B) Seção esquemática.	18
Figura 4 - Coluna Estratigráfica da Bacia do Paraná no estado de São Paulo.	20
Figura 5 – Mapa Geológico da área.....	21
Figura 6 - (A): Lateral da vala com o solo bastante argiloso; (B): Fragmentos de diabásio em horizonte saprolítico.	22
Figura 7 - Perfil de alteração do diabásio, encontrado próximo ao aterro sanitário.....	22
Figura 8 - Foto do diabásio indicando matriz fina.....	23
Figura 9 - (A)Foto do siltito com intercalações de arenito fino; (B) Foto do solo produto de alteração do siltito.....	23
Figura 10 – Esquema de reações de oxi-redução em um corpo de sulfeto.....	29
Figura 11 - Diferença de potencial produzida pelo metabolismo de bactérias em contaminantes orgânicos.....	29
Figura 12 - (A) Vista da vala; (B) Furo a trado manual.	31
Figura 13 - (A) Cabo com sensores; (B) Tubo coletor e o cabo âncorados.	31
Figura 14 - Colocando os resíduos cuidadosamente para não afetar o tubo coletor e o cabo com sensores.....	32
Figura 15 - (A) foto do Terrameter SAS 4000; (B) Leitura e coleta do potencial espontâneo.	32
Figura 16 – Esquema indicando contato lixo/solo no gráfico.	33
Figura 17 - Dados obtidos em campo e analisados.	35
Figura 18 - Gráfico com valores médios no parâmetro SP.	38
Figura 19 - Gráfico com os menores valores no parâmetro SP.	40
Figura 20 - Gráfico com valores da vazão de biogás.	41

LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Principais gases causadores do efeito estufa, as suas origens, e o potencial de aquecimento global.....	15
--	----

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo analisar dados de Potencial Elétrico Natural num aterro sanitário do tipo vala localizado no município de Cordeirópolis (SP). O procedimento de medidas envolveu inicialmente a montagem e instalação de um aparato de cabos, sensores e dreno para medidas geofísicas e de velocidade de fluxo de biogás numa vala posteriormente preenchida por resíduos sólidos domiciliares. O biogás é um produto da degradação de matéria orgânica contida nos resíduos, por ação de microorganismos em ambiente anaeróbico. Seu elevado conteúdo em metano caracteriza este gás como um combustível potencialmente utilizável em sistemas de geração de energia ou vapor. A área de estudos é caracterizada por solo de composição argilosa proveniente da alteração de sill de diabásio correlacionado ao evento Serra Geral, sobreposto a siltitos da Formação Tatuí, com nível freático local em torno de 50m. Os cabos foram instalados na vertical em paralelo com dreno coletor de gás, que permitiu a coleta de dados por meio da técnica da perfilagem geofísica a cada 15 dias num período de oito meses. Para a análise dos dados foram utilizados quatro parâmetros no estudo, tempo de fechamento da vala, potencial elétrico natural, velocidade da vazão de biogás e pluviosidade. Com os dados tabelados foram construídos gráficos para cada dia de coleta que demonstram valores no intervalo do cabo que está em contato com o lixo (200 cm – 400 cm) e intervalo do cabo em contato com o solo (600 cm – 800 cm). Posteriormente foram gerados gráficos com o período de oito meses para análise geral dos dados tabelados. Houve correlação estatística dos dados, que demonstram a influência da chuva na produção do biogás. Os resultados obtidos foram satisfatórios e demonstraram a viabilidade do método de pesquisa em estudos para a análise da viabilidade energética pela captura do biogás.

ABSTRACT

This work aims to analyze data from a Natural Electric Potential landfill type ditch located in Cordeirópolis (SP). The procedure measures initially involved the assembly and installation of an apparatus cables, sensors and drain geophysical measurements and flow rate of biogas in a ditch later filled by solid waste. Biogas is a product of degradation of organic matter in waste by the action of microorganisms in an anaerobic environment. Its features high methane content in the gas potentially usable as fuel in energy generation systems or steam. The study area is characterized by clayey soil composition change from the diabase sill correlated to the event Serra Geral Formation siltstones overlapping Tatuí with groundwater level site around 50m. The cables were installed vertically in parallel with drain gas manifold, which allowed the collection of data by the technique geophysical logging every 15 days over a period of eight months. For data analysis we used four parameters in the study, the closing time of the ditch, natural electric potential, the flow velocity of biogas and rain. With the tabulated data plots were constructed for each collection day showing values in the range of the cable is in contact with waste (200 cm - 400 cm) and range of the cable in contact with the soil (600 cm - 800 cm). Subsequently graphs were generated with the period of eight months to analyze the data tabulated. A statistical correlation data, which show the influence of rainfall on the production of biogas. The results were satisfactory and demonstrated the feasibility of the research method in studies for the feasibility analysis for the capture of biogas energy.

Keywords: Spontaneous Potential, Biogas, Environmental, Monitoring, Residue.

1 INTRODUÇÃO

A Organização Mundial da Saúde define saneamento como o controle de fatores que atuam sobre o meio ambiente e que exercem, ou podem exercer, efeitos prejudiciais ao bem-estar físico, mental ou social do homem (CELERE et al., 2007). Esta definição também compreende o conceito de limpeza urbana, que engloba, além de outros serviços, a coleta, o tratamento e a destinação final do lixo ou resíduos sólidos.

Atualmente, uma das grandes preocupações ambientais está relacionada à destinação final de resíduos sólidos gerados pela sociedade moderna e consumista.

Com o avanço do processo industrial, aliado ao crescimento da população e à consequente demanda por bens de consumo, a atual sociedade produz quantidades crescentes e significativas de resíduos sólidos, que diante de incipientes políticas de reaproveitamento e reciclagem, resultam num grande problema aos gestores públicos para o meio ambiente.

As composições dos resíduos oriundos das atividades domiciliares e comerciais estão diretamente ligadas ao crescimento social, econômico e tecnológico.

O Brasil possui um grande potencial para aproveitamento energético de subprodutos relacionados à matéria orgânica contida em resíduos. No país, tem se tornado cada vez mais comum a utilização da técnica de compostagem, que é a biodegradação de restos de matéria orgânica de produções agrícolas e agropecuárias, desde fezes de animais, bovinos, suínos entre outros animais, juntamente com restos de alimentos e essa técnica produz muito biogás além de outros subprodutos. O biogás que é gerado das composteiras, no Brasil, já é utilizado para produção de energia.

Aliado a este fator, o clima predominante no Brasil favorece degradabilidade intensa e efetiva da matéria orgânica, fatores que refletem a elevada taxa de produção de biogás em aterros. A decomposição da matéria orgânica contida nos resíduos por ação de microorganismos gera produtos como o chorume e o biogás.

O chorume é um resíduo líquido de elevada carga iônica, e que pode ser dividido por quatro frações principais: matéria orgânica dissolvida, compostos orgânicos xenobióticos, macrocomponentes inorgânicos e metais potencialmente tóxicos (MORAIS et al, 2006).

O biogás é composto basicamente CO_2 e CH_4 e H_2O , proveniente de atividades anaeróbicas, e está ocorrendo em três etapas: a primeira etapa, as bactérias fermentativas hidrolisam a complexa matéria orgânica em moléculas solúveis. Na segunda etapa, estas moléculas são convertidas por bactérias formadoras de ácidos em simples, ácidos orgânicos, dióxido de carbono e hidrogênio; os principais ácidos produzidos são o ácido acético, ácido

propiónico, ácido butírico e etanol. Finalmente, na terceira fase, o metano é formado por bactérias metanogênicas, quer por decomposição dos ácidos em metano e dióxido de carbono, ou através da redução do dióxido de carbono com o hidrogênio (THEMELIS; ULLOA, 2007).

A geofísica é uma ciência baseada em estudos indiretos de materiais geológicos como solos e rochas ou materiais antrópicos como concreto e cerâmica, por meio de medidas de propriedades físicas como condutividade elétrica, densidade, magnetização, radioatividade, por meio de instrumentos de medição. Os métodos geofísicos são muito utilizados para caracterização e monitoramento de áreas contaminadas ou potencialmente contaminadas, devido a alterações em determinados parâmetros físicos provocados pela presença de compostos químicos no ambiente geológico.

Um caso de estudo realizado por Naudet et al.(2003), utiliza o método do Potencial Espontâneo, para delinear uma frente redox, de uma pluma de contaminação e com isso criar um modelo de geobateria, que propõe uma relação quantitativa entre o potencial espontâneo e, o que poderia ser usado para inverter o potencial espontâneo em termos de medições *in situ* em valores de potencial redox plumas contaminantes.

O presente estudo propõe o uso do método de Potencial Espontâneo, por meio da técnica de perfilagem geofísica, numa vala de resíduos localizada no aterro sanitário de Cordeirópolis (SP), município de pequeno porte, na tentativa de estabelecer correlações de variação entre parâmetros físicos e vazão de biogás.

Apesar deste método ser pouco utilizado e estudado pela literatura para casos voltado ao meio ambiente, o presente trabalho propõe demonstrar a eficiência do mesmo e mostrar a boa correlação com outros parâmetros, no caso produção de biogás e pluviosidade.

A análise deste parâmetro físico está relacionado diretamente com a atividade biológica produtora do biogás e permite o auxílio da criação de projetos para instalação de sistema de geração de energia elétrica pela queima do biogás.

2 OBJETIVO

O estudo teve como objetivo analisar dados de potencial elétrico natural, ao redor do tubo de dissipação de gás instalado no aterro sanitário do tipo vala localizado no município de Cordeirópolis (SP).

A proposta foi à instalação de drenos de gases e cabos posicionados na vertical que cruzam o intervalo de resíduos e intervalos de solo na base da vala.

Desta forma o trabalho envolveu leituras de Potencial Elétrico Natural (SP) por meio do cabo, velocidade de fluxo de biogás por meio do dreno quinzenalmente, num período de oito meses.

A análise integrada dados pode proporcionar a compreensão do grau de influencia de fatores como pluviosidade e o tempo de residência dos resíduos, na variação do potencial elétrico natural e velocidade de fluxo de biogás.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo irá contextualizar a área de estudo do modo geral, e trará estudos de caso com método geofísico empregado neste trabalho.

3.1 Biodegradação e Aterro Sanitário

A geração e a taxa de produção de biogás são condicionadas por diversos fatores (UNITED STATES ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY, 1991):

- Composição do lixo: quanto a maior a porcentagem de materiais biodegradáveis, maior a taxa de geração de gases. O lixo destinado aos aterros pode ter uma composição variada ao longo do ano dependendo do clima e dos hábitos de consumo da população local.

- Umidade do lixo: uma umidade alta (60% a 90%) pode aumentar a geração de biogás. A construção do aterro com baixa permeabilidade para controle da formação do chorume mantém a umidade do lixo baixa e prejudica a formação de biogás.

- Idade do lixo: a geração do biogás segue uma sequência de cinco fases de decomposição. A duração de cada fase e o tempo de produção de metano depende de condições específicas de cada aterro.

- Temperatura do aterro: a produção de metano é afetada pela temperatura. A temperatura ideal para a digestão anaeróbia está entre 29°C e 38°C para as bactérias mesofílicas e entre 49°C e 70°C para as termofílicas. Abaixo de 10°C há uma queda brusca na taxa de geração do gás metano.

- pH do aterro: o pH ótimo para a produção do metano está entre 7.0 e 7.2. Inicialmente os aterros apresentam pH ácido, que tende a neutralidade posteriormente.

O biogás é uma preocupação ambiental, e quando ele é lançado para atmosfera é considerado como um dos agentes causadores do efeito estufa (Tabela 1), além de potencialmente danoso ao aquecimento global (ICLEI, 2009).

A ação de bactérias anaeróbicas na matéria orgânica contida nos resíduos sólidos consiste essencialmente na quebra de estruturas para obtenção de energia. Este processo ocorre em condições redutoras, onde a disponibilidade de oxigênio livre é baixa. Neste contexto, são utilizados receptores elétricos como catalizadores do processo metabólico, para obtenção de oxigênio (O₂). Esta liberação de elétrons no ambiente é mensurável por instrumentais analíticos, como medidores de potencial redox e equipamentos geofísicos.

Tabela 1 - Principais gases causadores do efeito estufa, as suas origens, e o potencial de aquecimento global.

Gases do Efeito Estufa (GEE)	Potencial de Aquecimento Global	Principais Causas
CO ₂ (dióxido de carbono)	1 x CO ₂ e (referência)	Uso intensivo de combustíveis fósseis, aumento da ocorrência de queimadas e incêndios florestais, que provocam o aumento das emissões de CO ₂ para a atmosfera; Redução das áreas florestadas, que absorvem e estocam o carbono atmosférico.
CH ₄ (metano)	21 x CO ₂ e	Degradação anaeróbica de material orgânico em aterros, estações de tratamento de efluentes, lagoas anaeróbicas com dejetos animais, além do processo digestivo de animais ruminantes (ex: gado bovino).
N ₂ O (óxido de nitrogênio)	310 x CO ₂ e	Queima de combustíveis fósseis, uso abusivo e incorreto de fertilizantes químicos no solo.
CFCs, HFCs, PFCs	140 x até 11.700 x CO ₂ e	Sistemas de refrigeração e sprays aerossóis
SF ₆ (hexafluoreto de enxofre)	22.500 x CO ₂ e	Produzido industrialmente para uso principalmente pela indústria elétrica, como meio isolante e extintor de arco elétrico, tanto em disjuntores, como em subestações blindadas

Fonte: (ICLEI, 2009).

Com o desenvolvimento das cidades e o aumento no consumo de bens e serviços, se tornou necessário uma destinação final ambientalmente adequada para os resíduos sólidos. Quando esses são dispostos inadequadamente, geram problemas de saúde pública e acentuam a degradação ambiental, sendo prejudiciais à qualidade de vida das populações. Assim, temos como possíveis destinações dos resíduos, incineração, compostagem, disposição em lixões e aterros tipo controlado ou sanitário, sendo a última a principal.

De acordo com a NBR 8419/1992, os aterros sanitários visam acumular resíduos urbanos no solo de forma a ocupar o menor espaço possível através de técnicas de engenharia para a compactação do solo em camadas recobertas diariamente por solo ou outro material inerte e gerar danos mínimos ao ambiente e saúde pública. O local de disposição dos resíduos deve possuir uma impermeabilização e drenos de gás para evitar a percolação de líquidos e captar gases advindos da decomposição.

Desta forma, a resolução CONAMA nº 404, de 11 de novembro de 2008 indica que, em municípios de pequeno porte a implementação e operação de aterro sanitário sofre dificuldades técnicas, operacionais e financeiras. Considerando essa dificuldade, estabeleceu-se que municípios com geração diária de até vinte toneladas de resíduos sólidos urbanos disponham seus resíduos de forma simplificada nos chamados aterros em vala (controlados).

Esse tipo de aterro difere dos sanitários, pois não possui impermeabilização, captação de gases e recobrimento diário dos resíduos dispostos.

De acordo com o Manual de Operação de Aterros Sanitários em Valas (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2010) a obra deve ser preferencialmente realizada em relevo plano por ser uma técnica de disposição dos resíduos abaixo do nível do terreno, facilitando a escavação. Não é necessária a impermeabilização complementar das valas com mantas de PEAD – Polietileno de Alta Densidade ou outro material. A área deve proporcionar uma vida útil ao aterro de no mínimo 15 anos e estar distante 500 metros de núcleos habitacionais e 200 metros de qualquer corpo d'água superficial existente nas proximidades. A escolha do local de implantação da obra deve considerar o tipo de solo e sua permeabilidade, o nível do lençol freático e o excedente hídrico da região.

3.2 Local De Estudo

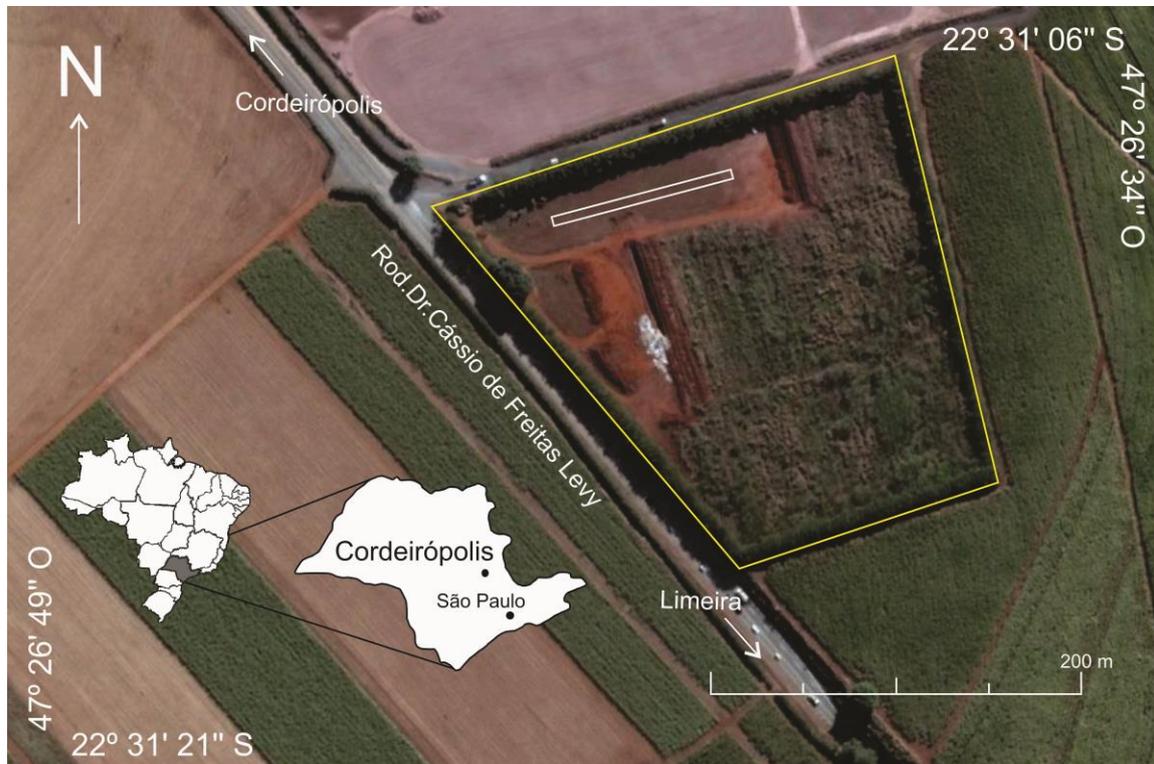
A área de estudo selecionada é o aterro sanitário do município de Cordeirópolis, Estado de São Paulo, localizado no km 4,5 da rodovia Cássio Freitas Levy (SP 017), que interliga os municípios de Limeira e Cordeirópolis (Figura 1).

O município possui aproximadamente 17.000 habitantes e a economia é baseada na produção de revestimentos cerâmicos e cultivo de cana-de-açúcar. A produção diária de resíduos sólidos domiciliares é da ordem de 6m^3 . A prefeitura municipal iniciou o projeto aterro sanitário em valas no ano 2000 (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2008).

O local do aterro sanitário do município de Cordeirópolis tem 48.400 m^2 de área disponível, com início das atividades em 11/2001 e vida útil prevista para 20 anos. O aterro é cercado por fazendas de cultivo de cana-de-açúcar (Figura 1). A topografia da área é plana, com declive médio de 0,5% sentido Sudeste e altitude entre 660 m e 659 m.

O aterro é do tipo controlado em forma de vala, para deposição apenas de resíduos sólidos domiciliares. A vala utilizada para o estudo tem 5m de profundidade, 4m de largura e 90m de comprimento e foi aberta por uma retroescavadeira (Figura 2A), para deposição de resíduos diretamente sobre o solo, em seguida um caminhão de lixo coloca os resíduos do lado da vala (Figura 2B), depois disso uma escavadeira coleta os material colocado ao lado da vala e lança para dentro da mesma (Figura 2C) e posteriormente a escavadeira coloca uma cobertura de aproximadamente 1 metro de solo (Figura 2D).

Figura 1 - Localização da área de instalação do dispositivo de monitoramento e o retângulo branco indica a localização da vala.



Fonte: Google Earth

A vala foi aberta em Setembro e no mês de Outubro houve seu fechamento, tendo assim iniciado as medições no mês de fechamento.

Abaixo foi feito uma figura esquemática da vala e uma visão em seção vertical da vala (Figura 3). Há cinco metros abaixo da base da vala, ocorre um Sill de diabásico que também está esquematizado.

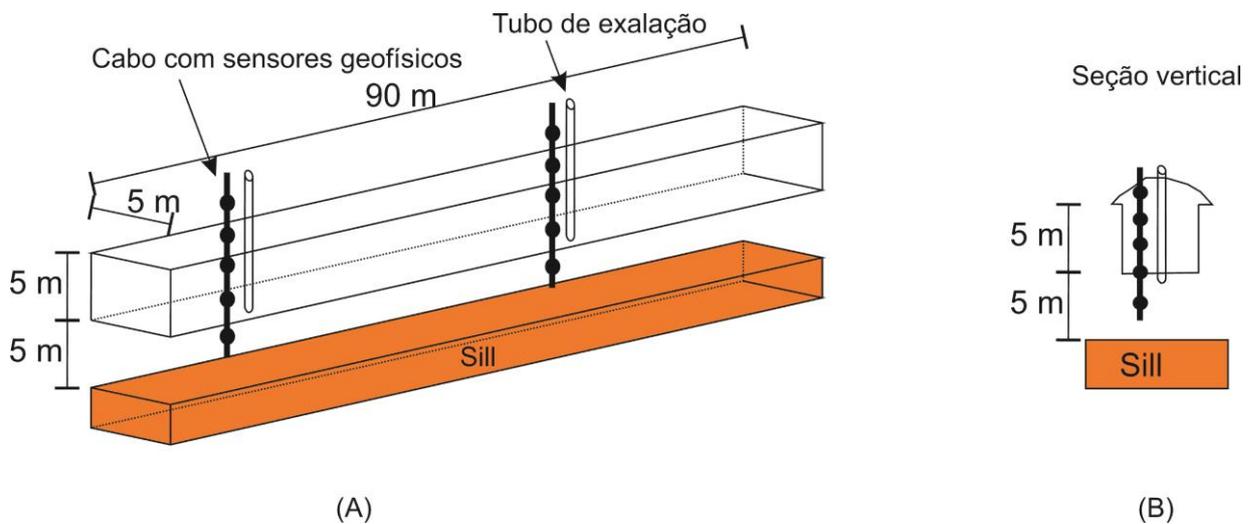
O nível freático local está localizado a 50 m de profundidade, próximo ao contato basal da Formação Tatuí (MOREIRA et al., 2011).

Figura 2 - Etapas de operação do aterro: (A) Abertura de vala; (B) Descarga de resíduos; (C) Lançamento e cobertura dos resíduos; (D) Valas finalizadas.



Fonte: Do Autor

Figura 3 – (A) Desenho esquemático da vala; (B) Seção esquemática.



Fonte: Do Autor

3.3 Geologia

3.2.1 Geologia Regional

A Bacia do Paraná é uma ampla bacia intracratônica com formato alongado na direção NNE-SSW (1.750 km de comprimento e 900 km de largura), tendo registro de rochas sedimentares e vulcânicas de idades que variam do Ordoviciano ao Cretáceo.

A bacia exibe forma ovalada com eixo maior na direção N-S, e é plena representante do conceito de bacia intracratônica: ela está inteiramente contida na placa sul-americana e não apresenta relacionamento direto com as margens desta placa. Bacias intracratônicas ocorrem no interior continental, distantes de margens de placas (MILANI et al., 2007). A implantação da Bacia do Paraná ocorreu na forma de depressões alongadas na direção NE-SW, segundo a trama do substrato pré-cambriano (MILANI, 1997).

A estruturação da bacia segundo Zalán et al. (1990) está relacionada com o fim do ciclo brasileiro, controlada por direções herdadas do embasamento, representados por falhas ou zonas de falhas.

Na região de Rio Claro, a Bacia do Paraná apresenta a Coluna Estratigráfica demonstrada na Figura 4.

Na área de estudo (Figura 5) é encontrado a Formação Tatuí e uma soleira de diabásio relacionada à Formação Serra Geral.

A Formação Tatuí, no estado de São Paulo junta as formações Rio Bonito e Palermo, e consiste em siltitos e siltitos arenosos de coloração cinza, que podem apresentar cor amarelo-esverdeado por alteração.

No estado de São Paulo ocorrem, localmente, arenitos conglomeráticos que são encontrados normalmente bioturbados, o que resulta na quase completa destruição de suas estruturas sedimentares. Quando preservadas, as estruturas sedimentares, são caracterizadas laminações cruzadas de muito pequeno porte. O provável ambiente deposicional é marinho transgressivo de águas rasas, abaixo do nível de ação das ondas. Gastrópodos, Braquiópodos e restos vegetais são os registros fósseis encontrados na Formação Tatuí (SCHNEIDER et al., 1974). A idade é eo-Permiana (ASSINE; PERINOTTO, 2003).

A Formação Serra Geral compreende a sequência de derrames de lavas basálticas com intercalações de lentes e camadas arenosas na base. A Formação consiste em lavas basálticas, toleíticas, de textura afanítica, coloração cinza a negra, amigdaloidal no topo dos derrames e

com grande desenvolvimento de juntas verticais e horizontais. Intercalações de arenitos finos a médios, com estratificação cruzada tangencial (idêntica à da Formação Botucatu), ocorrem principalmente na parte basal. (SCHNEIDER et al., 1974).

Figura 4 - Coluna Estratigráfica da Bacia do Paraná no estado de São Paulo.

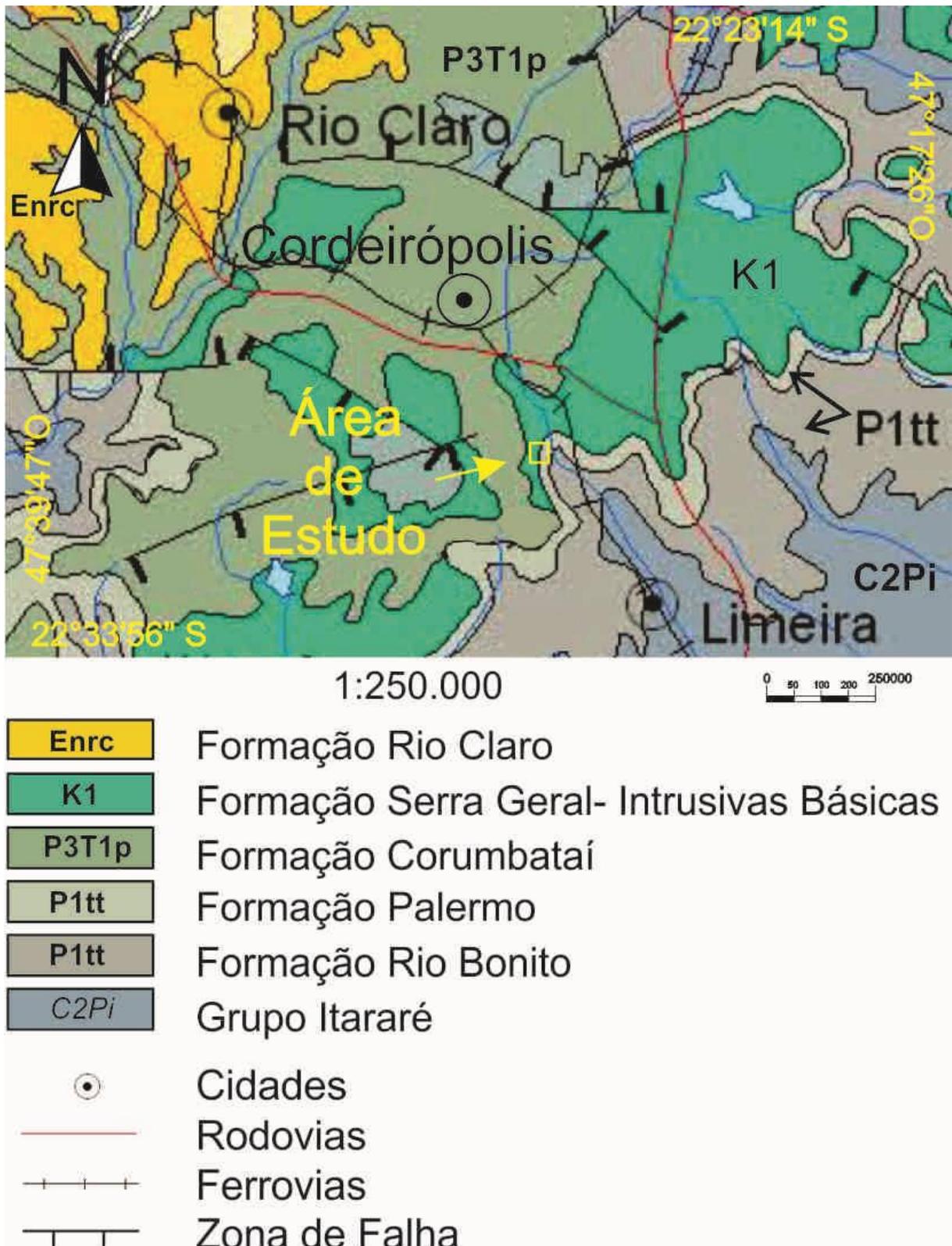
COLUNA ESTRATIGRÁFICA DA BACIA DO PARANÁ NA REGIÃO MAPEADA							
ERA	PERÍODOS	GRUPO	FORMAÇÃO	LITOLOGIA	Espes. Aprox. (metros)	DESCRIÇÃO SUCINTA	AMBIENTE DE DEPOSIÇÃO
CENOZÓICA	QUATERNÁRIO		RIO CLARO		30	ARENITOS POUCO CONSOLIDADOS COM LENTES DE ARGILAS E NÍVEIS CONGLOMERÁTICOS NA BASE <i>(Arenitos = reservatório de água subterrânea em poços rasos da região de Rio Claro)</i>	CONTINENTAL: PLANÍCIE ALUVIAL E LACUSTRES. COLUVIÕES
	TERCIÁRIO		ITAQUERI		100	ARENITOS CONGLOMERÁTICOS E ARENITOS SILICIFICADOS / FERRICRETES	CONTINENTAL: LEQUES ALUVIAIS
MESOZÓICA	CRETÁCEO	SÃO BENTO	SERRA GERAL		100	DERRAMES DE BASALTOS COM LENTES DE ARENITO NA BASE. DIQUES E SOLEIRAS DE DIABÁSIO <i>(Basalto e diabásio = matéria-prima para brita)</i>	MAGMATISMO FISSURAL
			BOTUCATU		100	ARENITOS BEM SELECIONADOS COM GRÃOS BEM ARREDONDADOS E BEM ESFÉRICOS, POUCA ARGILA	CONTINENTAL DESÉRTICO
			PIRAMBÓIA		150	ARENITOS COM GRÃOS ARREDONDADOS E ESFÉRICOS, DIVERSOS NÍVEIS DE LAMITOS	CONTINENTAL: FLUVIAL E DESÉRTICO
PALEOZÓICA	PERMIANO	PASSA DOIS	CORUMBATAÍ		100	SILTITOS CONTENDO LENTES DE ARENITOS FINOS ARGILITOS, SILTITOS, ARENITOS FINOS, NÍVEIS DE CALCÁRIOS DOLOMÍTICOS E COQUINAS <i>(Argilitos = matéria-prima para a indústria cerâmica da região de Rio Claro)</i>	CONTINENTAL: LACUSTRE MISTO: PLANÍCIE DE MARE
			IRATI		40	FOLHELHOS, SILTITOS, FOLHELHOS PIROBETUMINOSOS, CALCÁRIOS DOLOMÍTICOS <i>(pedreiras de calcário na região de Assistência, Apicima e Piracicaba/Saltinho)</i>	MISTO: LAGUNA/PLATAFORMA
		TATUI		50	SILTITOS E SILTITOS ARENOSOS	MISTO: PLANÍCIE COSTEIRA/PLATAFORMA	
		ITARARÉ		900	ARENITOS, SILTITOS, VARVITOS E DIAMICTITOS (ALGUNS VERDADEIROS TILITOS) <i>(Arenitos = reservatórios de água subterrânea em poços profundos da região)</i>	CONTINENTAL: GLACIAL FLUVIAL LACUSTRE	
						MISTO MARINHO (GLÁCIO-MARINHO)	
CARBONÍFERO							
Pré-Cambriano			EMBASAMENTO			GRANITOS, MIGMATITOS, GNAISSES, XISTOS, QUARTZITOS	

Fonte: Perinotto e Zaine (2008), modificado de Soares & Landim (1975).

O contato inferior com os arenitos da Formação Botucatu é discordante. Com as unidades mais antigas, é marcado por discordância erosiva. O contato superior também é discordante com a Formação Bauru. (SCHNEIDER et al., 1974).

A Formação Serra Geral é resultado do intenso vulcanismo de fissura iniciado quando ainda ocorriam as condições desérticas de sedimentação da Formação Botucatu. A idade principal do vulcanismo é do Cretáceo Inferior, mas já existiam derrames precursores no Jurássico Superior (CORDANI; VANDOROS, 1967).

Figura 5 – Mapa Geológico da área.

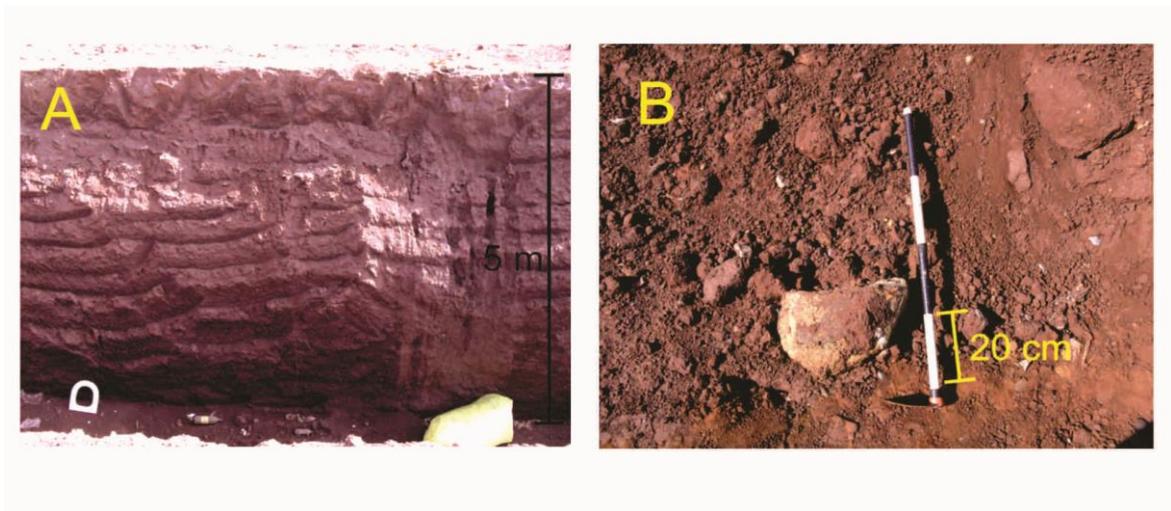


Fonte: Modificado de Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 2006.

3.2.2 Geologia Local

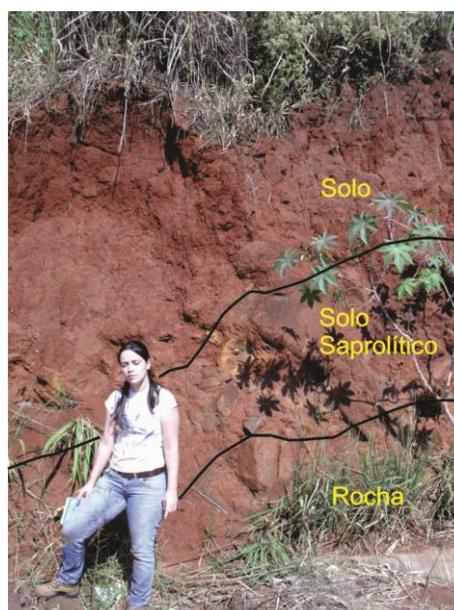
O substrato do local apresenta um solo argiloso com 10 metros de espessura, sendo o produto de alteração de uma soleira de diabásio (Figura 7), e este é relacionado ao evento Serra Geral, portanto é atribuído a Formação Serra Geral (Figura 6).

Figura 6 - (A): Lateral da vala com o solo bastante argiloso; (B): Fragmentos de diabásio em horizonte saprolítico.



Fonte: Do Autor.

Figura 7 - Perfil de alteração do diabásio, encontrado próximo ao aterro sanitário.



Fonte: Do Autor

Sotoposto ao solo argiloso, há uma soleira de diabásio com 15 metros de espessura, também relacionado à Formação Serra Geral (Figura 8).

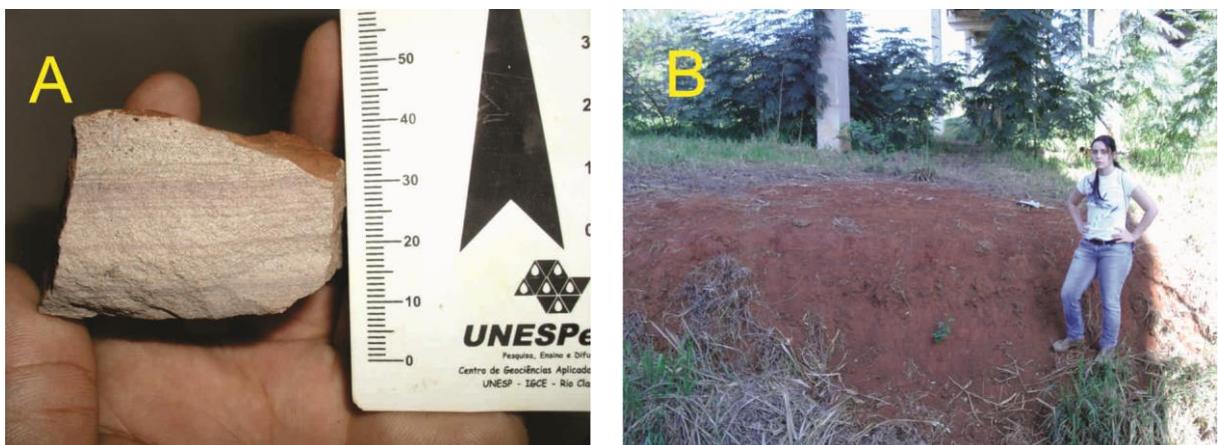
Figura 8 - Foto do diabásio indicando matriz fina.



Fonte: Do Autor.

Abaixo da soleira de diabásio, são encontrados arenitos finos intercalados com siltitos que são pertencentes da Formação Tatui (Figura 9).

Figura 9 - (A)Foto do siltito com intercalações de arenito fino; (B) Foto do solo produto de alteração do siltito.



Fonte: Do Autor.

3.3 Revisão de Trabalhos Anteriores

Os métodos geofísicos são muito utilizados para caracterização e monitoramento de áreas contaminadas ou potencialmente contaminadas, devido a alterações em determinados parâmetros físicos provocados pela presença de compostos químicos no ambiente geológico.

Neste item, é apresentado alguns trabalhos utilizados na pesquisa bibliográfica, como demonstrativos de aplicações práticas do método geofísico utilizados neste trabalho.

O primeiro trabalho revisado foi o de Nyquist e Corry (2002), e segundo os autores o método é pouco utilizado e pouco explorado com relação aos outros métodos geofísicos. Em contra partida explicam como funciona o método de potencial espontâneo, o potencial bioelétrico, o potencial de fluxo, o potencial mineral e como podem ser afetados essas potencias por influencia geotermal, de topografia, fator antrópico, entre outros.

Os autores explicam o modelo clássico de Sato e Monney (1960), que é utilizado a mais de quarenta anos, para demonstrar como funciona o modelo de “geobateria” exemplificado sempre como um depósito de sulfeto. Porém ao decorrer da explicação os autores levantam questões importantes, com relação ao modelo, como por exemplo, o modelo chega a medir até 800 mV de anomalia, só que já foi constatado anomalias com 1000 mV para mais com relação a depósitos de sulfetos, outra questão importante que os autores levantam é que não há a necessidade de um ambiente redox para fazer a medição, pois a ligação entre os eletrodos enterrados, com o aparelho de medição (para fechar o circuito) cria um ambiente redox, sem necessariamente no subsolo ter um ambiente redox, e para isso eles citam a anomalia SP associada com o minério de esfarelita e corpos pórfiros que não são condutores. Por ser um método relativamente barato, o método de potencial espontâneo , segundo os autores devem ser incluídos em monitoramentos contínuos, seja para contaminação de gasolina, entre outras contaminações. Isso foi concluído depois de acompanharem vários testes de contaminações com diferentes métodos geofísicos, e também pela qualidade, rapidez dos resultados obtidos, e pelo custo.

Um caso de estudo realizado por Naudet et al. (2003), utiliza o método do Potencial Espontâneo, para delinear uma frente redox, de uma pluma de contaminação e com isso criar um modelo de geobateria, que propõe uma relação quantitativa entre o potencial espontâneo e, o que poderia ser usado para inverter o potencial espontâneo em termos de medições *in situ* em valores de potencial redox em plumas contaminantes. Foi feito uma etapa preliminar, uma tomografia de resistividade elétrica, para analisar a direção do fluxo das águas que em geral deram NE-SW, mas alguns paleocanais de alta transmissividade modificam localmente o

fluxo. Em seguida foi feito um levantamento SP usando um voltímetro de alta pedância para a coleta dos dados, sendo que a linha de pesquisa era feita como uma rede de pontos, e foram coletados os dados ao longo do ano. O trabalho conclui que a pluma de contaminação rica em matéria orgânica, modelo de geobateria, são uma fonte de campo elétrico em que a sua assinatura pode ser gravada na superfície do solo com sinais de potencial espontâneo, e que a correlação entre o potencial espontâneo corrigido do efeito eletrocinético e as variações de redox são razoáveis.

O trabalho de Baker e Cull (2004), foi feito na Tasmânia no River King onde foi realizado medições de potencial de corrente para detecção e quantificação de contaminantes nas águas subterrâneas antes da remediação do problema. Foram coletadas amostras de areias do local e realizado ensaios num reservatório simples contendo um fornecimento do fluido, água, nos poros para controlar a pressão de condução. Para cada tipo de areia foi medido um potencial de corrente. Os autores utilizaram o método de potencial espontâneo para fazer essas medições e concluíram que ele é eficaz para a observação do problema e para o mapeamento deste antes da reparação da pluma contaminante. No entanto é preciso fazer uma calibração para a análise dos dados, sendo que é necessário vincular modelos hidrológicos com dados geofísicos em situações complexas nessa calibração.

No aterro sanitário do município de Bauru - SP, Lago et al. (2006), utilizam os métodos de resistividade elétrica, polarização induzida e potencial espontâneo no estudo das relações espaciais entre a área de disposição de resíduos e o ambiente natural, e com a finalidade de auxiliar a definição do sentido do fluxo subterrâneo. Os autores realizaram nove sondagens elétricas verticais de resistividade, cinco linhas de caminhamento elétrico dipolo-dipolo de resistividade e polarização induzida e cinco linhas de potencial espontâneo. As conclusões para a utilização dos três métodos, na caracterização geoambiental da área de disposição de resíduos sólidos urbanos da cidade de Bauru – SP foi muito importante, pois possibilitou aos autores identificar a pluma de contaminação e orientar a locação adequada de poços de monitoramento na área. Foi concluído também que o método SP forneceu respostas precisas e úteis ao estudo do fluxo da água subterrânea.

O trabalho feito por Jouniaux et al. (2009), constituiu de uma revisão no método de potencial espontâneo voltado para hidrogeofísica. Segundo os autores os levantamentos SP, combinado com outros métodos geofísicos, são úteis para localização e quantificação dos fluxos de água subterrânea e plumas de poluentes se espalhando, e estima das propriedades hidráulicas pertinentes a aquíferos. Os autores concluem que existe um interesse crescente na

utilização do método SP e acreditam que o método possa servir como método de monitoramento de longo prazo para processos microbianos.

Um trabalho recente de Moreira et al. (no prelo), foi estudado a relação entre as idades dos resíduos naturais e a geração de potencial elétrico no aterro sanitário do município de Cordeirópolis. O trabalho consistiu em analisar o potencial elétrico natural obtido sobre valas de resíduos sólidos domésticos, com datas de encerramento controladas. Os dados de interpretação sugeriram a geração de potencial elétrico predominantemente através do fenômeno de redox, em oposição ao fenômeno potencial de fluxo. A análise estatística dos dados indicou uma correlação entre o tempo de residência dos resíduos e variações crescentes de tensão. Segundo os autores os resultados mostram a possibilidade de aplicação do método em estudos de áreas de disposição de resíduos sólidos domésticos, seja em estudos preliminares em áreas sob a ausência de dispositivos de monitoramento ambiental, ou como uma técnica complementar de investigação, mas que a aplicação do método e os resultados obtidos foram possíveis devido à ausência de ruídos elétricos e a pequena área coberta durante o levantamento.

4 MÉTODO E ETAPAS DE TRABALHO

4.1 Método do Potencial Espontâneo

A prospecção elétrica envolve a detecção de efeitos de superfície produzidos pelo fluxo de corrente elétrica no solo.

O potencial espontâneo que ocorre no subsolo é causado pela atividade eletroquímica ou mecânica. O fator que controla todos os casos é a água subterrânea. Estes potenciais são associados com intemperismo de corpos minerais de sulfeto, a variação nas propriedades das rochas em contatos geológicos, atividade bioelétrica de material orgânico, gradientes de corrosão, térmico e de pressão em fluidos subterrâneos e outros fenômenos de natureza semelhante (TELFORD, 1990).

O método de potencial natural elétrico ou potencial espontâneo é caracterizado pela realização de leituras de campo elétrico natural, sem necessidade de quaisquer circuitos de injeção de corrente elétrica ou geração de campo eletromagnético (ORELLANA, 1972).

Quando o potencial espontâneo está associado há um corpo de minério de sulfeto, ele resulta em queda de potencial ôhmico dentro das rochas encaixantes. A corrente elétrica é produzida por separadas, mas simultâneas, reações de redução de agentes oxidantes próximo da superfície e a oxidação de agentes redutores em profundidade. O minério não participa diretamente de qualquer reação, mas serve como um condutor para transferir os elétrons dos agentes redutores aos agentes oxidantes. A possibilidade das reações acima ocorrerem depende das diferenças de potencial de oxidação das águas subterrâneas em diferentes profundidades. Na zona de intemperismo, o potencial de oxidação é controlado pelo mecanismo de redução do oxigênio. Na zona abaixo do nível de água, o potencial é provavelmente controlado pelo equilíbrio oxido-redução de minerais ricos em ferro.

O potencial disponível é independente do tipo de minério. A diferença de potencial máxima disponível para produzir correntes naturais é estimado em: grafite 0,8, pirita 0,7, covelita 0,6, calcocita 0,5, galena 0,3 volts.

O potencial espontâneo será grande, se o corpo do minério (1) é composto de minerais difíceis para oxidar (2), tem baixa resistência elétrica (continuidade física com baixa resistividade), (3) se estende verticalmente entre o nível de água, e (4) existir perto da superfície (SATO; MOONEY, 1960).

O mecanismo de funcionamento do potencial espontâneo ocorre associado devido a gradientes de concentração de íons específicos, no subsolo criando uma diferença de potencial. Se os cátions e ânions que estão envolvidos, tiverem diferentes mobilidades, então

a diferença de taxas de difusão irá criar o potencial elétrico, porque os íons de mobilidade mais rápida com carga irão ultrapassar os íons de carga oposta (NYQUIST; CORRY, 2002). O campo elétrico resultante faz acelerar os íons mais lentos em movimento, para manter a eletroneutralidade.

O equilíbrio, o potencial de difusão, E_d , é dado por (Equação 1):

$$E_d = \frac{RT(I_a - I_c)}{nF} \ln(C_1/C_2) \quad (\text{Equação 1})$$

Onde I_a e I_c são as mobilidades dos anions e cátions, respectivamente, n é a carga eléctrica/ion, R é a constante universal dos gases, T é a temperatura absoluta, F é constante de Faraday, e C_1 e C_2 são as concentrações da solução criando o gradiente de difusão.

Em geral, este mecanismo pode criar anomalias nas dezenas de milivolts, e é apenas uma fonte de ruído na maioria dos levantamentos SP.

Contrastes de potencial espontâneo resultam de variações de temperatura, gradiente de pressão, porosidade, migração de fluidos, variação de resistividade e da umidade do solo (CORWIN, 1990).

A influência da mobilidade dos íons não acaba sendo muito expressiva, pois ela vai variar muito dependendo dos tipos de rochas envolvida no sistema e dos fatores citados anteriormente, portanto a equação final de Nernst (Equação 2) é:

$$E_d = \frac{RT}{nF} \ln(C_1/C_2) \quad (\text{Equação 2})$$

São relacionados três fenômenos de geração de potencial espontâneo, são classificados em potencial mineral, eletrolítico e eletroquímico.

O potencial mineral ocorre segundo as reações geoquímicas de oxidação/redução num corpo de minério, equivalentes a célula galvânica definida pela Eletroquímica (Figura 10).

O potencial eletrolítico ou potencial de transmissão é relacionado ao fluxo produzido pela passagem de fluido com sais dissolvidos, num meio poroso ou fraturado, cuja diferença de potencial é medida. Em áreas de alta pluviosidade, topografia íngreme e de rochas porosas o potencial eletrolítico pode ser de grande amplitude.

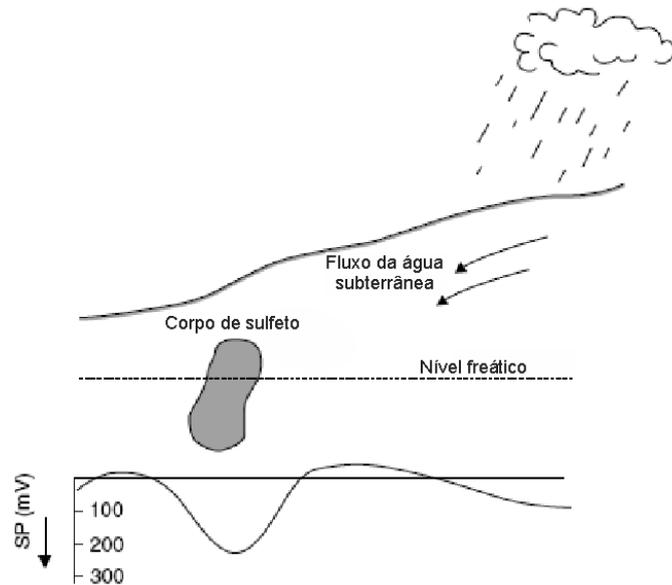
É possível calcular (Equação 3) o campo elétrico (E) para um fluxo em um tubo capilar (NYQUIST; CORRY, 2002):

$$E = \frac{\varphi \zeta}{4\pi\mu} \rho \quad (\text{Equação 3})$$

Onde campo elétrico, E , (V m⁻¹) ε = constante dielétrica do eletrólito (F m⁻¹), ρ = a resistividade da (Ω m) eletrólito, ζ = parâmetro um determinado pelo material da parede do

capilar e do eletrólito, $p =$ gradiente de pressão (Pa m^{-1}), e $\mu =$ viscosidade do eletrólito (Pa s). E é na mesma direção que o gradiente de pressão, oposto ao sentido do fluxo de eletrólito.

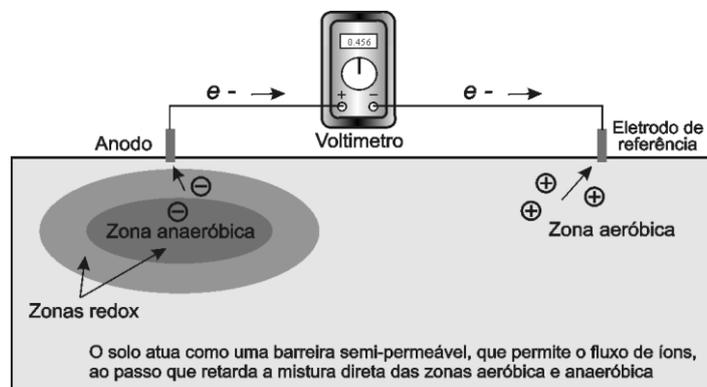
Figura 10 – Esquema de reações de oxi-redução em um corpo de sulfeto



Fonte: (MILSOM, 2003).

Por fim o potencial eletroquímico pode ser originado de processos como o de raízes de plantas bombeando água e isso gera anomalia bioelétrica, como também a biodegradação num contexto de solo ou aquífero com hidrocarbonetos ou matéria orgânica sólida (Figura 11).

Figura 11 - Diferença de potencial produzida pelo metabolismo de bactérias em contaminantes orgânicos.



Fonte: Adaptado de NYQUIST; CORRY, 2002.

No caso da área de estudo trata-se principalmente de um potencial eletroquímico de biodegradação de matéria orgânica.

A vantagem segundo Corry, 1985, é que o método é rápido, econômico, a instrumentação envolvida, a facilidade de aquisição de dados em pequenas áreas, a variabilidade do parâmetro físico quando medido no ambiente geológico são simples. As principais desvantagens associadas ao método, se comparada com os métodos eletromagnéticos por exemplo, são a necessidade de cabos que são a conexão entre os eletrodos e o equipamento, uso de eletrodos não polarizáveis, além da alta possibilidade de ruídos produzidos por sistemas elétricos como transformadores, aterramentos e motores, elementos que inviabilizam ensaios em grandes áreas ou em ambiente urbano.

4.2 Aquisição e Processamento de dados.

4.2.1 Instalação de Equipamento e Coleta de Dados

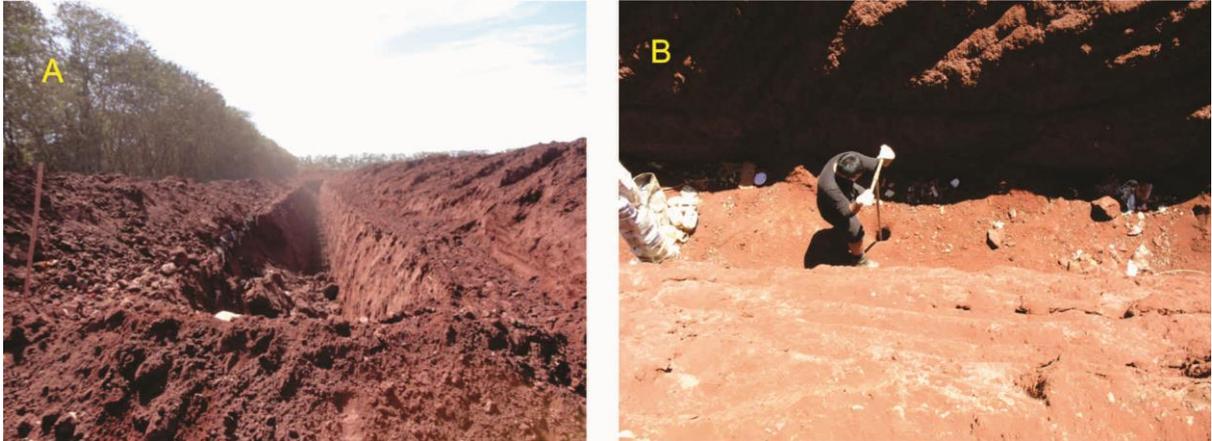
Os resíduos sólidos presentes no aterro controlado são recobertos por uma camada de solo após o preenchimento total da célula de disposição. Este contexto permite a instalação de condições físico-químicas redutoras nos resíduos, algo que colabora para a proliferação de colônias de microrganismos anaeróbicos.

A partir do estabelecimento de um ponto de referencia externo ao aterro, é possível a realização de medidas de potencial elétrico natural. A ação de microrganismos anaeróbicos nos resíduos resulta na geração de potencial elétrico, cujo contraste com uma área de referência externa, possibilita medições por meio de instrumentos geofísicos.

A geração de chorume e suas características químicas, físicas e microbiológicas, também estão relacionadas aos processos de decomposição de matéria orgânica presentes em aterros, além de gases como CO_2 e CH_4 . Este subproduto consiste num líquido escuro, enriquecido em sais e com elevada demanda química e biológica por oxigênio.

Na área de estudo foi aberta uma vala (Figura 12A) de 5m de profundidade, 4m de largura e 90m de comprimento por uma retroescavadeira. Em seguida foi realizado um furo a trado manual (Figura 12B) de aproximadamente 4 metros no fundo da vala (Figura 12).

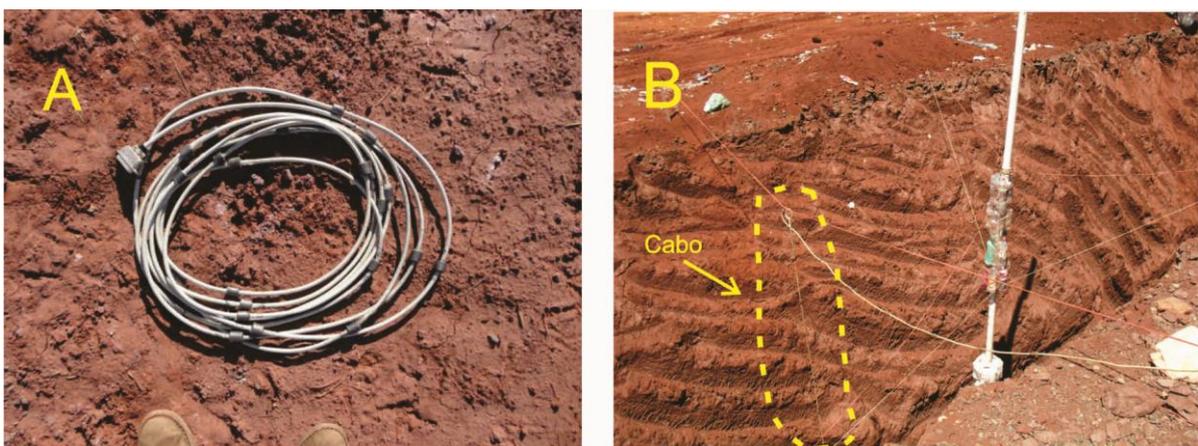
Figura 12 - (A) Vista da vala; (B) Furo a trado manual.



Fonte: Do Autor.

Foi preparado cabos com sensores não polarizáveis, constituídos de grafite, com 40cm de espaçamento entre sensores (Figura 13A), o cabo de aproximadamente 10 metros de comprimento. Em seguida foi lançado o cabo no furo realizado no fundo da vala. Paralelo ao cabo instalado foi instalado um tubo, de PVC, coletor de gás (Figura 13B) e ele foi ancorado nas laterais da vala para ficar na vertical. O cabo foi esticado na vertical paralelo ao tubo de PVC.

Figura 13 - (A) Cabo com sensores; (B) Tubo coletor e o cabo âncorados.



Fonte: Do Autor

Em seguida conforme fosse chegando caminhões de lixo, foram dispostos sacos de lixo de tal forma na vala para que não comprometesse a estrutura do tubo coletor de gás e do cabo com sensores (Figura 14).

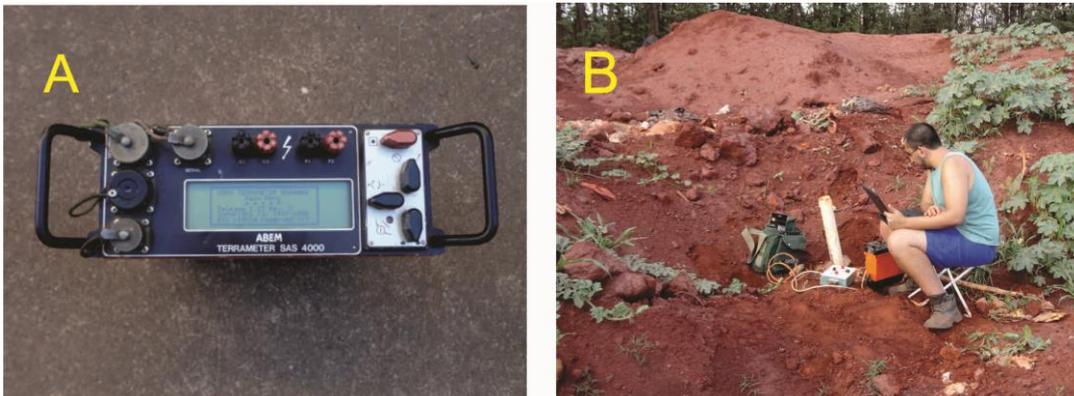
Figura 14 - Colocando os resíduos cuidadosamente para não afetar o tubo coletor e o cabo com sensores.



Fonte: Do Autor.

Então assim que o lixo preencheu a vala, 1 mês após a abertura da vala, foi utilizada a técnica de perfilagem geofísica para leitura do parâmetro potencial espontâneo (Figura 15B). Foi utilizado o resistivímetro Terrameter SAS 4000 (Figura 15A), que possibilita leituras de resistividade elétrica, cargabilidade e potencial elétrico natural, por meio de ciclos periódicos de leitura em intervalos de tempo programados (ABEM, 2006).

Figura 15 - (A) foto do Terrameter SAS 4000; (B) Leitura e coleta do potencial espontâneo.



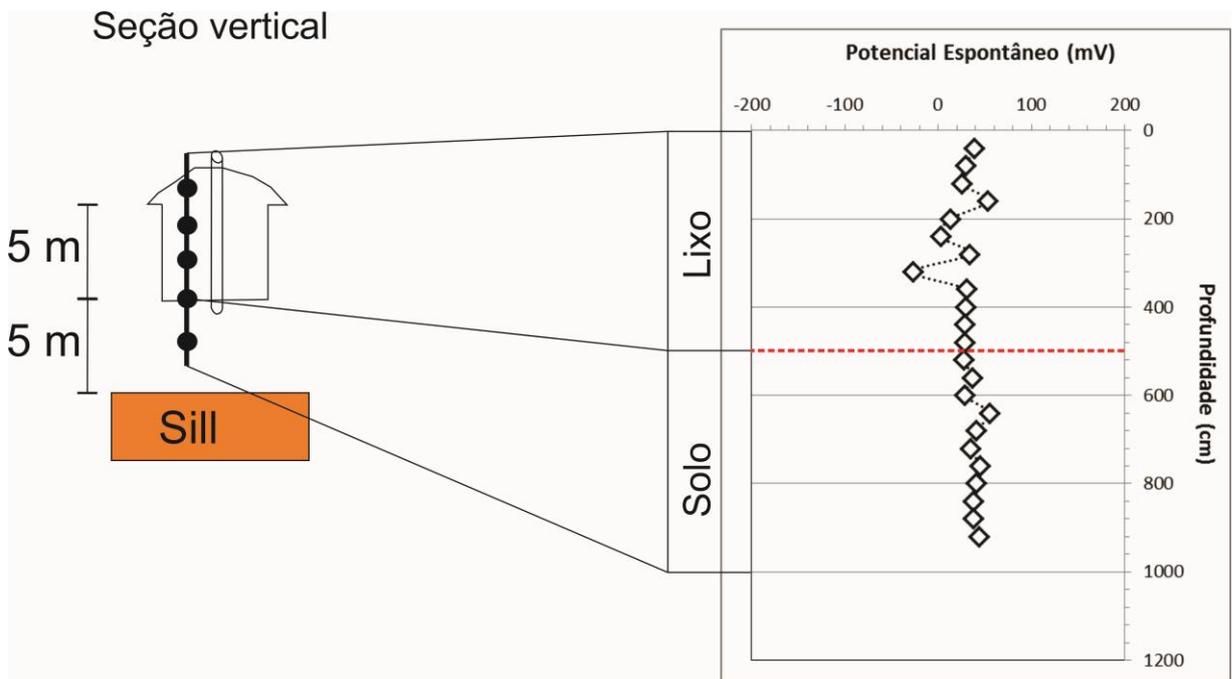
Fonte: Do Autor.

Os dados foram coletados em aproximadamente a cada quinze dias, tanto dados geofísicos como dados de pluviosidade. Os dados pluviométricos utilizados foram da estação meteorológica automática do laboratório de topografia e geodésia da Faculdade de Tecnologia - FT – Unicamp, coordenado pelo Prof. Dr. Hiroshi Paulo Yoshizane¹.

4.2.2 Processamento de Dados

A coleta dos dados foi realizada do mês de Outubro de 2012, até o mês de Maio de 2013. Os dados coletados quinzenalmente foram tabelados no programa Excel versão 2010, e foram gerados gráficos para cada dia de coleta com dois parâmetros, a profundidade no eixo X e o SP no eixo Y (Figura 16).

Figura 16 – Esquema indicando contato lixo/solo no gráfico.



Fonte: Do Autor

¹ Dados recebidos por email de Júlio César Teixeira dos Santos, bolsista do Prof. Dr. Hiroshi Paulo Yoshizane.

Feito os gráficos, a partir deles foi selecionado dois intervalos de profundidade que apresentaram maiores variações de valores, tanto na parte em que o cabo com sensores estava soterrado, em contato com o solo, como na parte em que o cabo com sensores estava em contato direto com o lixo. O intervalo de 200 cm – 400 cm foi definido para o intervalo do cabo em contato com o lixo e de 600 cm – 800 cm foi o intervalo definido para o cabo em contato com o solo.

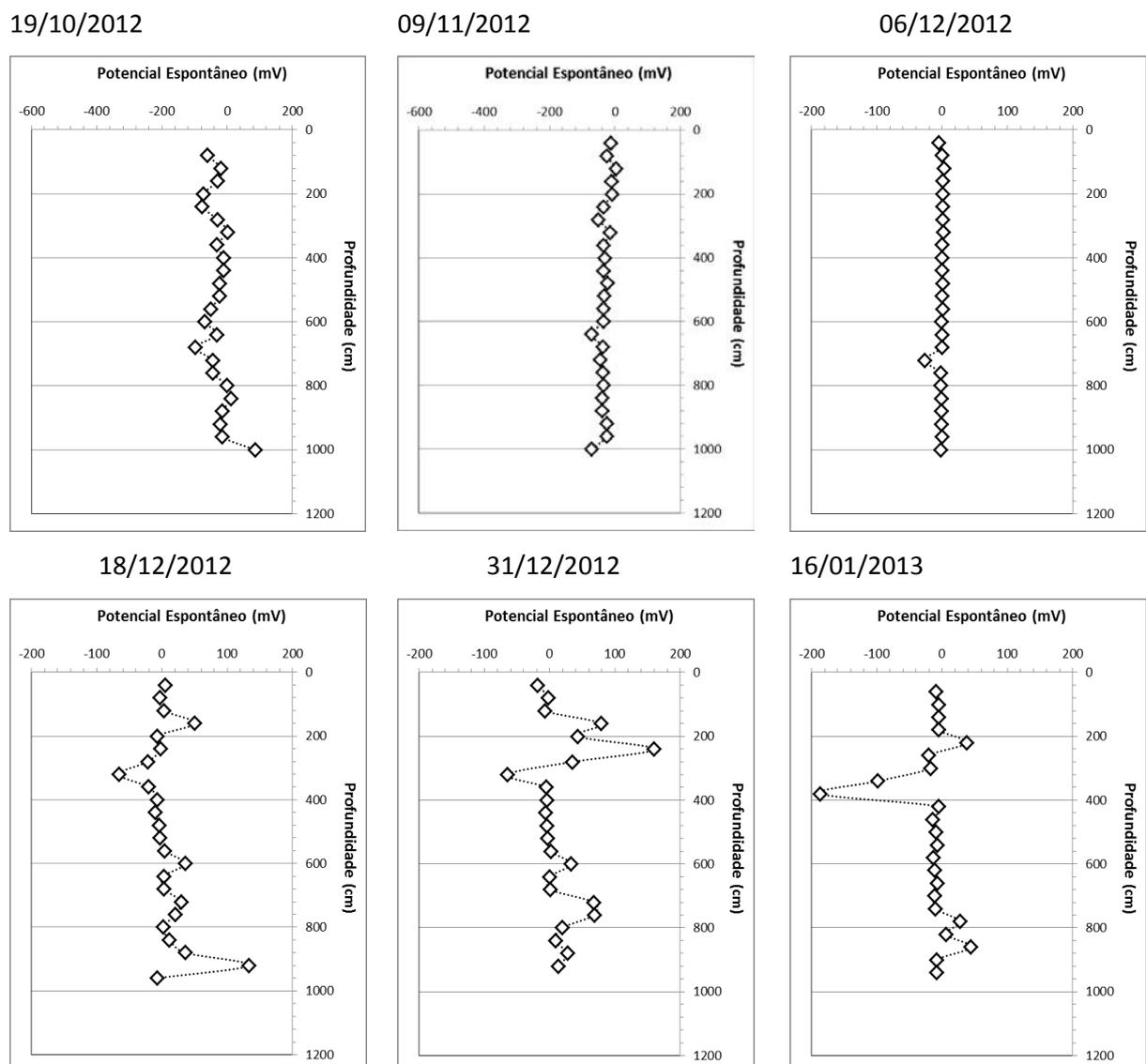
Após essa análise, foi construído 3 gráficos utilizando o programa Grapher versão 8, com os parâmetros de pluviosidade, dados de SP, período de monitoramento e velocidade de fluxo do gás.

5 RESULTADOS

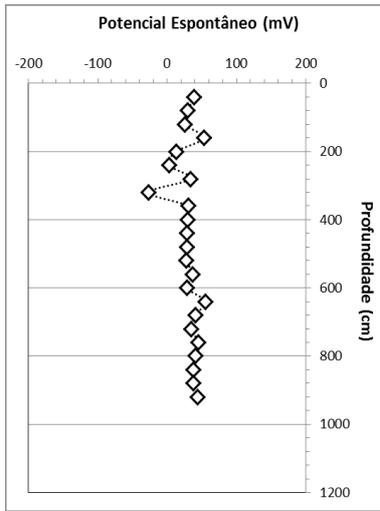
Foram feitas três análises comparativas, que serão demonstradas a seguir e discutidas.

Para fazer essas análises foi escolhido um parâmetro em comum, a pluviosidade. Os dados obtidos no aterro (Figura 17) foram analisados por dois intervalos mais representativos para a parte em que o cabo está em contato com o lixo e para a parte do cabo em contato direto com o solo. O intervalo selecionado do cabo em contato com o lixo é de 200 cm a 400 cm e é analisado o potencial espontâneo gerado pela biodegradação da matéria orgânica. Já o intervalo em que o cabo está em contato direto com o solo é o de 600 cm a 800 cm, pois é analisado o potencial de fluxo, no caso fluxo de choro.

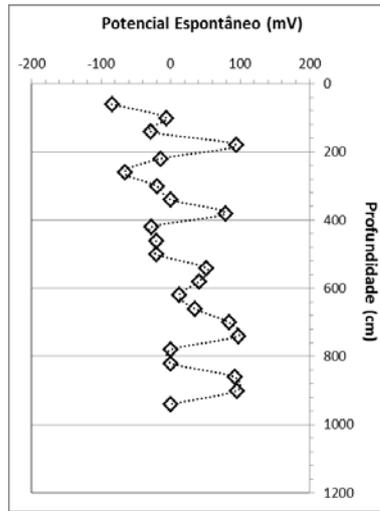
Figura 17 - Dados obtidos em campo e analisados.



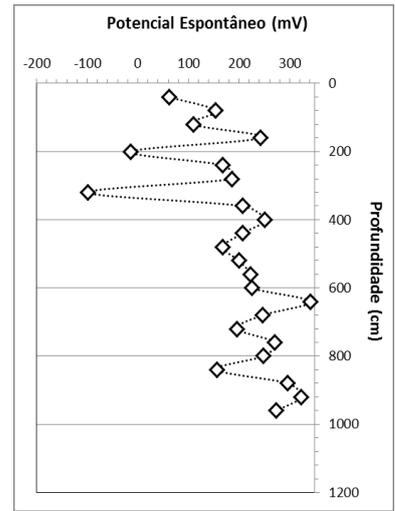
05/02/2013



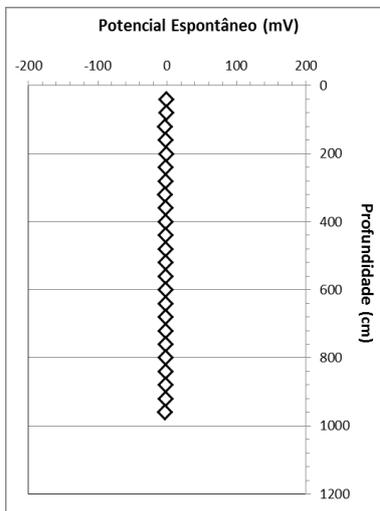
19/02/2013



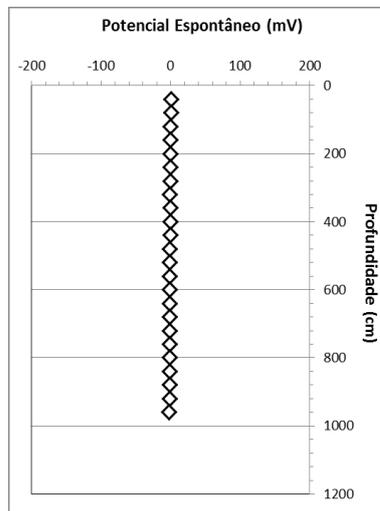
09/03/2013



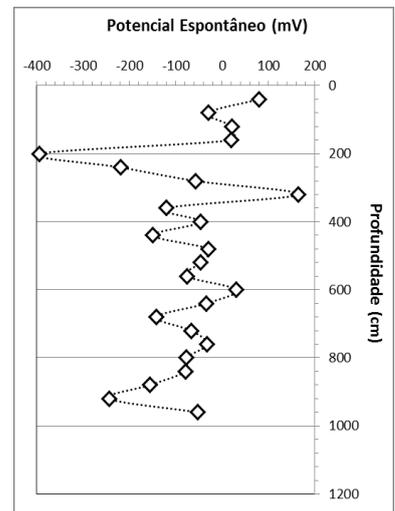
04/04/2013



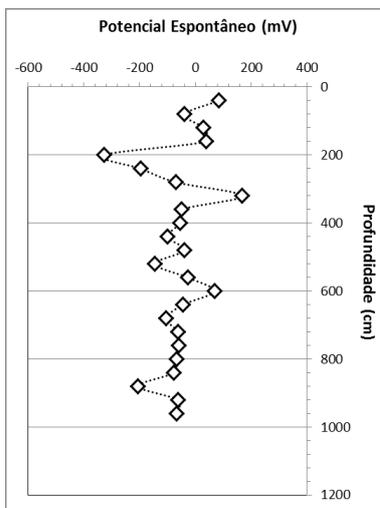
19/04/2013



02/05/2013



16/05/2012



Fonte: Do Autor

Para a primeira análise, demonstrada a seguir, é feito uma média aritmética dos valores obtidos pelos sensores e em seguida plotada no gráfico (Figura 18).

Os resultados dos gráficos demonstram ser muito semelhantes tanto na parte da biodegradação, quanto na parte do potencial de fluxo.

No período de março ocorre um pico de atividade aeróbica, e diminuição na produção de chorume, tendo em seguida uma queda até o fim de maio, ou seja, aumenta de fato as atividades anaeróbicas, produção de gás, e produção de chorume.

São utilizados valores médios, dos intervalos analisados, e por isso os gráficos ficavam próximo do valor zero para o potencial espontâneo, portanto para a análise de produção de biogás, esse gráfico não foi suficiente para ser representativo.

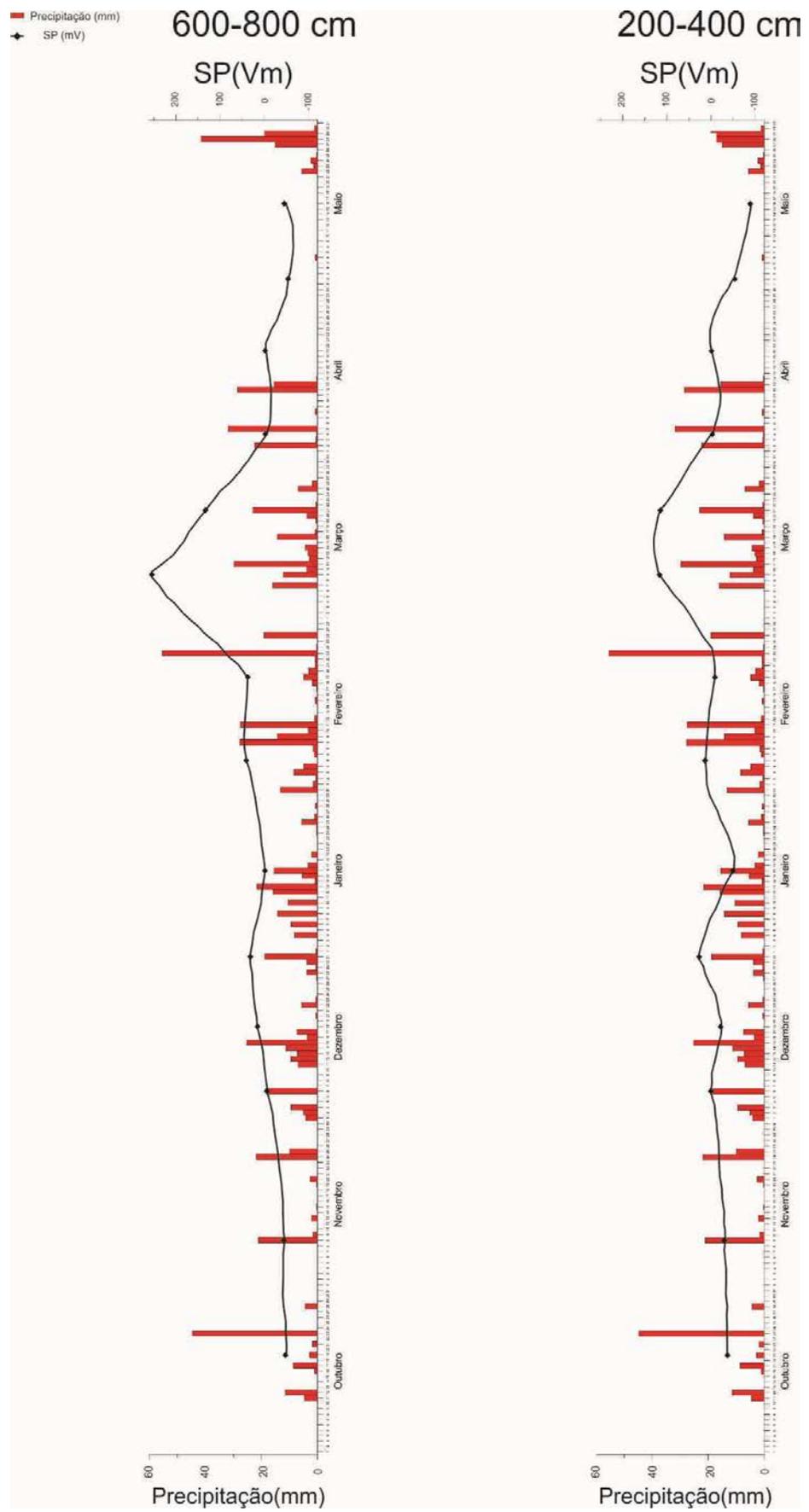
Para analisar melhor a produção de biogás, foram gerados outros gráficos com os menores valores obtidos (Figura 19), nos intervalos de 200 cm - 400 cm e 600 cm – 800 cm, pois a atividade anaeróbica gera menores valores de potencial espontâneo.

Então é observado que no intervalo de 200 cm - 400 cm, onde há apenas o lixo, a curva de potencial espontâneo tem uma variação maior, devido estar próximo a superfície e em contato com um material mais heterogêneo, o lixo. O gráfico mostra que inicialmente os valores oscilam próximo ao valor zero do potencial espontâneo e tem uma tendência a subir suavemente até o início do mês de dezembro. Em janeiro há uma queda ao longo do mês até o dia 16, onde foi feito a coleta de dados e em seguida a curva volta a subir até o início do mês de fevereiro. A curva tem uma queda mais suave até o mês de março.

De março até o dia 19 de abril, ocorre a subida da curva, indicando a influência da chuva no qual é sucedido por uma queda brusca, no período mais longo de seca. Essa queda indica a intensa atividade anaeróbica, ou seja, nesse período ocorreu grande produção de biogás. Em seguida a curva mostra uma subida suave novamente.

No gráfico do intervalo de 600 cm - 800 cm, a curva mostra pouca oscilação ao longo dos meses e indica que a chuva teve uma influencia na produção de chorume. Quando chega no dia 12 de março, há um pico positivo que mostra uma queda na produção de chorume. Depois desse pico o gráfico apresenta uma tendência de valores negativos até o dia 2 de maio, aumento da produção de chorume, depois volta a ter uma subida suave. Essa queda no final e a subida, nos três últimos pontos, mostram um período de produção de chorume e que acompanha a curva de produção de biogás.

Figura 18 - Gráfico com valores médios no parâmetro SP.



Fonte: Do Autor.

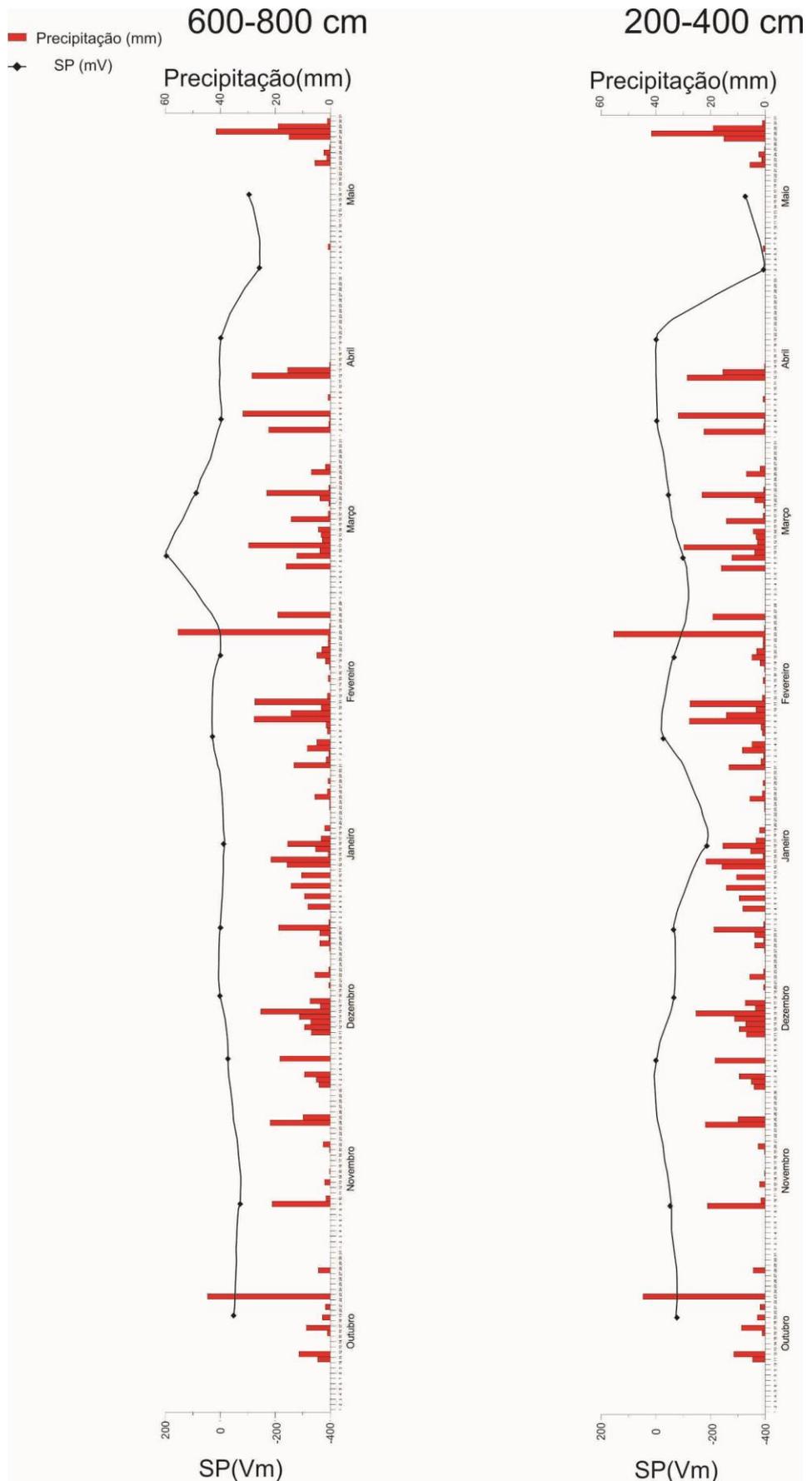
É possível perceber que quando a curva fica próxima aos meses de pouca chuva há uma variação mais expressiva e quando ela chega ao período de seca a curva cai de uma forma mais acentuada.

A terceira análise feita é de gráficos que relacionam os parâmetros de velocidade de vazão de gás, com o tempo e o potencial espontâneo com os menores valores (Figura 20).

Essa análise é importante ser feita, pois ela indica se há uma relação da velocidade de vazão do biogás com os valores obtidos de potencial espontâneo da produção do chorume e do biogás. Os gráficos mostram que inicialmente a velocidade é baixa, mas que ao longo do tempo ela aumenta e chega a um pico no dia 31 de dezembro, e esse pode ser observado também na linha de potencial espontâneo de 200 cm - 400 cm. Após esse pico há uma queda brusca nos valores de velocidade, tendo uma ligeira subida suave até o início de março.

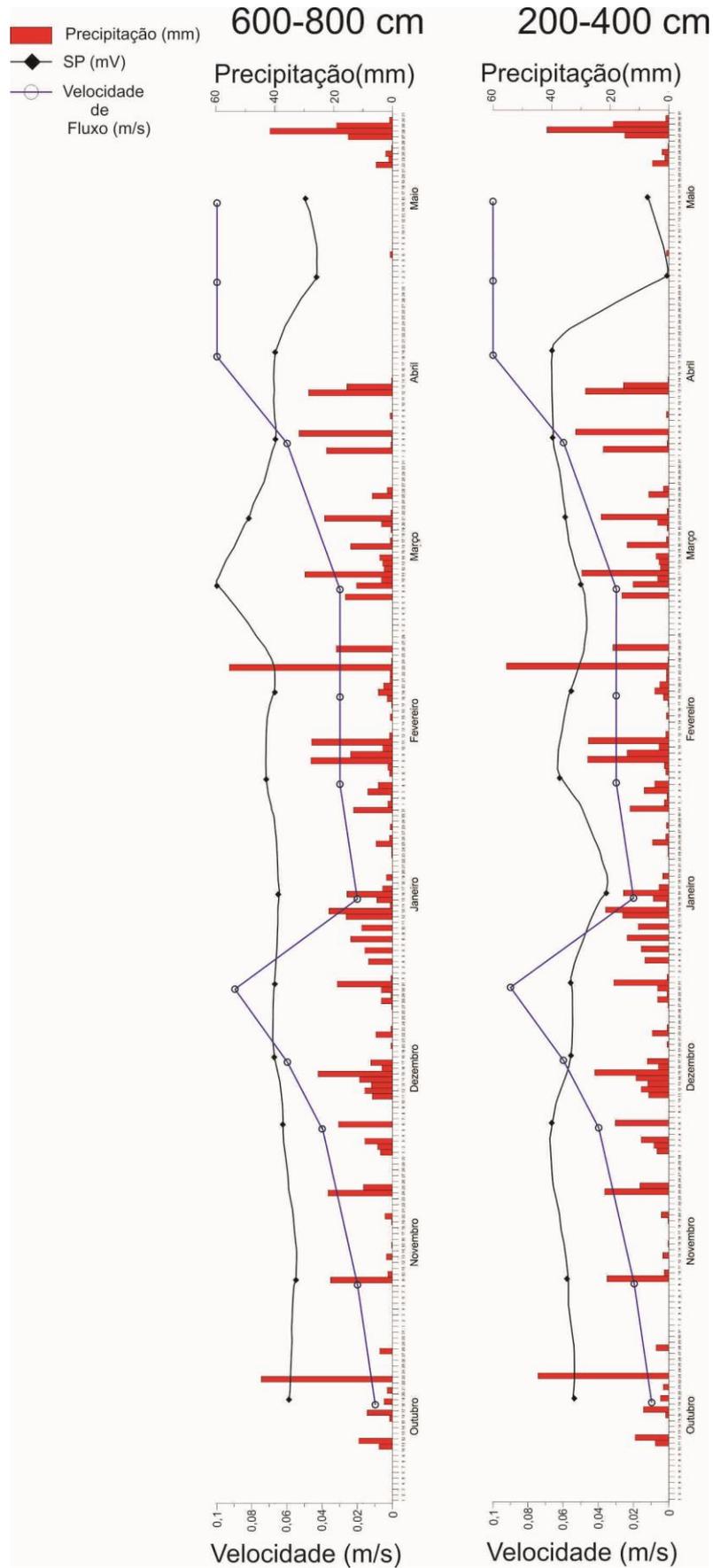
No dia 4 de abril começa a subir novamente, com valores mais expressivos, o que é interpretado como o aumento na produção de biogás. Isso é observado na queda brusca da curva de 200 cm - 400 cm e no aumento da produção de chorume, observado também na queda da curva de 600 cm - 800 cm.

Figura 19 - Gráfico com os menores valores no parâmetro SP.



Fonte: Do Autor

Figura 20 - Gráfico com valores da velocidade de fluxo do biogás.



Fonte: Do Autor.

6 CONCLUSÃO

O estudo demonstra que o aparato experimental e o método geofísico do potencial espontâneo são interessantes para monitoramentos de longos períodos. Os resultados sugerem a possibilidade da incorporação deste produto em projetos de viabilidade energética pela captura e queima de biogás em aterros.

A instrumentação utilizada é viável, apesar de ter sido trabalhosa de instalar pois houve perfuração a trado manual, e conforme os cabos e os tubos fossem levantados e ancorados havia o cuidado de colocar o lixo na base dos mesmos cuidadosamente para que não causasse danos nos equipamentos.

Foi possível realizar o monitoramento, com ressalvas a serem feitas, com relação a quantidade de chuva durante o período, algo que dificultou o monitoramento por prejudicar a leitura do equipamento eletrônico, além de problemas de vandalismo que prejudicou parte do experimento. Contudo o método de monitoramento demonstra sua exequibilidade, cuja análise integrada dos resultados mostrou correlações, como a queda de valores de SP acompanhada do aumento da curva de velocidade do fluxo de gás, num período de ausência de chuva.

É possível também com o método gerar um mapa com zonas mais propícias a conter bolsões de biogás e assim realizar um monitoramento deles.

Vale ressaltar que a chuva não influencia inicialmente nos resultados como foi demonstrado nos gráficos, mas ao longo do tempo ela passa a ter uma influência maior em processos de biodegradação da matéria orgânica. Contudo o regime de chuvas exerce pouca influencia na produção e percolação de chorume no solo sotoposto aos resíduos, conforme o potencial elétrico medido, associado ao fluxo neste horizonte.

Portanto os resultados obtidos foram satisfatórios e o método de potencial espontâneo e o sistema demonstraram ser eficientes para esse tipo de estudo.

REFERÊNCIAS

ABEM. Terrameter SAS 4000 / SAS 1000: instruction manual. Sundbyberg, 2006. 136f.

ASSINE, M. L.; ZACHARIAS, A. A.; PERINOTTO, J. A. A. Paleocorrentes, paleogeografia e seqüências deposicionais da Formação Tatuí, centro-leste do Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências, Local*, v.33, p. 33-40, 2003.

BAKER, S. S.; CULL, J. P. Streaming potential and groundwater contamination. *Exploration Geophys.*, New York, v.35, p.41-44, 2004.

CELERE, M. S.; OLIVEIRA, A. S.; TREVILATO, T. M. B.; SEGURA-MUÑOZ, S. I. Metais pesados presentes no chorume coletado no aterro sanitário de Ribeirão Preto, São Paulo, Brasil, e sua relevância para saúde pública. *Caderno de Saúde Pública*, Rio de Janeiro, v.23, n.4, p.939-47, 2007.

CORRY, C. Spontaneous polarization associated with porphyry sulfide mineralization. *Geophysics*, [Tulsa], v.50, n.6, p. 1020-1034, 1985.

CORWIN, R. F. The self-potential for environmental and engineering applications. In: *Geotechnical and Environmental Geophysics*, Society of Exploration Geophysics, Tulsa, USA, *Investigations in Geophysics*, no 5, 1990, p.127-145.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb2008/PNSB_2008.pdf>. Acesso em: 15 out. 2012.

ICLEI. GOVERNOS LOCAIS PELA SUSTENTABILIDADE (Brasil). Manual para aproveitamento do biogás: aterros sanitários. São Paulo, 2009. v.1.

JOUNIAUX, L.; MAINEULT, A.; NAUDET, V.; PESSEL, M.; SAILHAC, P. Review of self-potential methods in hydrogeophysics, *Comptes Rendus Geoscience*, Paris, 2009.

LAGO A. L.; ELIS V. R.; GIACHETI H. L. Aplicação integrada de métodos geofísicos em uma área de disposição de resíduos sólidos urbanos em Bauru – SP. *Revista Brasileira de Geofísica*, São Paulo, v. 24, n. 3, p. 357–374, 2006.

MILANI, E. J. Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu 40 relacionamentos com a geodinâmica fanerozóica do gondwana sul-ocidental. 1997. 255

f. Tese (doutorado em geociência) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

MILANI, E. J.; MELO, J. H. G.; SOUZA, P. A.; FERNANDES, L. A.; FRANÇA, A. B. - Bacia do Paraná. Boletim de Geociências da Petrobrás, Rio de Janeiro, v.15, n.2, p. 265-287, 2007.

MILSOM, J., *Field Geophysics*. 3.ed. Chichester: Wiley, 2003. 232 p. (The Geological Field Guide Series)

MORAIS, J. L.; SIRTORI, C.; PERALTA-ZAMORA, P. G. Tratamento de chorume de aterro sanitário por fotocatalise heterogênea integrada a processo biológico convencional; *Química Nova*, São Paulo, v.29, n. 1, p. 20-23, 2006.

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

MOREIRA C. A.; BRAGA A. C. O.; HASEN M. A. F. Estimativa do tempo de produção de chorume em aterro controlado por meio de medidas de resistividade elétrica. *Revista Brasileira de Geofísica*, São Paulo, v. 41, n. 3, p. 549-557, 2011.

MOREIRA C.A.; BRAGA A.C.O.; GODOY L.H.; SARDINHA D.S. Relationship between age of waste and natural electric potential generation in Sanitary Landfill. *Geofísica Internacional*, México,[2013]. No prelo.

NAUDET, V.; REVIL, A.; BOTTERO, J. Y.; BÉGASSAT, P. Relationship between self-potential (SP) signals and redox conditions in contaminated groundwater. *Geophysical Research Letters*, Washington, v. 30, n. 21, p. 1-4, 2003.

NYQUIST, J. E.; CORRY, C. E. Self-potential: The ugly duckling of environmental geophysics. *The Leading Edge*, Tulsa, v. 1, p. 446-451, 2002.

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

SATO M.; MOONEY H. M. The electrochemical mechanism of sulfide self-potentials. *Geophysics*, [Tulsa], v. 25, p. 226-249, 1960.

SCHNEIDER, R. L.; MUHLMANN, H.; TOMMASI, E.; MEDEIROS, R. A.; DAEMON, R. F.; NOGUEIRA, A. A. Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28, 1974, Porto Alegre. *Anais...* Porto Alegre: SBG, 1974. v.1, p. 41-65.

TELFORD W. M.; GELDART L. P.; SHERIFF R. E. Applied Geophysics. 2.ed. New York: Cambridge University Press,1990. 784 p.

THEMELIS N.J.; ULLOA P.A. Methane generation in landfills. Renewable Energy, Oxford, v. 32, p. 1243–1257, 2007.

UNITED STATES ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY (USEPA). Emission Standards Division. Air emissions from municipal solid waste landfills: background information for proposed standards and guidelines. Washington, DC, 1991. (EPA-450/3-90-011a).

ZÁLAN, P. V.; WOLFF, S.; CONCEIÇÃO, J. C. J.; MARQUES, A.; ASTOLFI, M. A. M.; VIEIRA, I. S.; APPI, V. T.; ZANOTTO, O. A. Bacia do Paraná. In: De RAJA G.; MILANI, E. J. (Coord.). Origem e Evolução das Bacias Sedimentares. Local: PETROBRAS,1990.

PERINOTTO, J. A. J.; ZAINÉ, J. E. Anotações de aula de Geologia de Campo I. 2008.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. Manual de Operação de Aterro Sanitário em Valas. São Paulo, 2010, 24 p.