

Trabalho de Formatura

Curso de Graduação em ENGENHARIA AMBIENTAL

**MONITORAMENTO GEOFÍSICO NO ATERRO CONTROLADO DO MUNICÍPIO
DE CORDEIRÓPOLIS (SP)**

Paula Gomes Junqueira

Rio Claro (SP)

2014

PAULA GOMES JUNQUEIRA

MONITORAMENTO GEOFÍSICO NO ATERRO CONTROLADO DO MUNICÍPIO DE CORDEIRÓPOLIS (SP)

“Projeto de Pesquisa apresentado à Comissão do Trabalho de Formatura do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental, Instituto de Geociências e Ciências Exatas – Unesp, Campus de Rio Claro, como parte das exigências para o cumprimento da disciplina Trabalho de Formatura no ano letivo de 2014”.

Orientador: Prof. Dr. César Augusto Moreira

Rio Claro – SP
2014

PAULA GOMES JUNQUEIRA

**MONITORAMENTO GEOFÍSICO NO ATERRO CONTROLADO NO
MUNICÍPIO DE CORDEIRÓPOLIS (SP)**

*Trabalho de Formatura apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências
Exatas, Campus de Rio Claro (SP), da
Universidade Estadual Paulista Júlio
de Mesquita Filho, para obtenção do
grau de Engenheiro Ambiental.*

Comissão Examinadora
Prof. Dr. César Augusto Moreira (orientador)
Ms. Alice Marques Pereira
Dr. José Ricardo Melges Bortolin

Rio Claro, 26 de Junho de 2014.

assinatura do(a) aluno(a)

assinatura do(a) orientador(a)

551 Junqueira, Paula Gomes
J95m Monitoramento geofísico no aterro controlado do
 município de Cordeirópolis (SP) / Paula Gomes Junqueira. -
 Rio Claro, 2014
 36 f. : il., figs., gráfs.

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

 1. Geofísica. 2. Aterro sanitário. 3. Resíduos sólidos. 4.
 Resistividade elétrica. 5. Chorume. 6. Biodegradação. I.
 Título.

RESUMO

Os métodos geofísicos são amplamente aplicados em trabalhos de caracterização e monitoramento ambiental. O método da Eletorresistividade, em especial, apresenta uma ampla área de aplicações, mostrando-se comprovadamente eficaz em estudos de aterros de resíduos sólidos. O presente trabalho visa o monitoramento geofísico no aterro controlado do município de Cordeirópolis (SP) e analisa relações entre variações nos parâmetro resistividade elétrica, tempo de residência dos resíduos e o período de chuvas na região e os processos de biodegradação da matéria orgânica. Esta área não possui nenhum sistema de monitoramento para controlar os produtos gerados na decomposição da matéria orgânica contida nos resíduos, como manta de impermeabilização ou drenos para a coleta de chorume ou gases. Os resultados mostram que o parâmetro resistividade elétrica foi eficaz no monitoramento da pluma de contaminação no aterro.

Palavra-chave: Resíduos sólidos, resistividade elétrica, chorume, biodegradação

ABSTRACT

The geophysical methods are widely applied in environmental characterization and monitoring studies. The resistivity method, in particular, has a wide area of applications, being effective in studies of solid waste landfills. The present work propose a geophysical monitoring in the Cordeirópolis city controlled landfill and analyze relationships between variation of electrical resistivity parameter, the residence time of the solid waste in landfill, the rainfall in the region and the organic matter biodegradation processes. The study has no monitoring system to control the products generated in the organic matter decomposition found in waste such as sealing blanket or leachate or gas drains. The results shows that the electrical resistivity parameter was effective in monitoring the landfill contamination plume

Keywords: solid waste, electrical resistivity, leachate, biodegradation

LISTA DE ABREVIATÖES

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

AGRITEMPO: Sistema de Monitoramento Agrometeorológico

CETESB: Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo

CONAMA: Conselho Nacional de Meio Ambiente

NBR: Norma Brasileira

PROPE: Pró-Reitoria de Pesquisa Unesp

SMA: Secretaria de Meio Ambiente de São Paulo

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Princípio da Eletrorresistividade medida com uma matriz de quatro eletrodos.	6
Figura 2: Localização da área de instalação do dispositivo de monitoramento.	11
Figura 3: Etapas de operação do aterro. (A) Abertura de vala; (B) Descarga de resíduos; (C) Lançamento e cobertura dos resíduos; (D) Valas finalizadas. Fonte: Adaptado de Moreira et al. (2011).	13
Figura 4: Perfil da área de estudos, indicando a vala de resíduos sólidos e solo.	14
Figura 5: (A) Vista da vala; (B) Furo a trado manual.	15
Figura 6: (A) Cabo com sensores; (B) Tubo de PVC e o cabo ancorados.	15
Figura 7: Despejo cuidadoso dos resíduos para não afetar o tubo de PVC e o cabo com sensores.	16
Figura 8: (A) Foto do Terrameter SAS 4000; (B) Leitura de resistividade elétrica	17
Figura 9: Medidas realizadas a 4,2m de profundidade.	18
Figura 10: Medidas realizadas a 5,8m de profundidade.	19
Figura 11: Medidas realizadas a 9,4m de profundidade.	20
Figura 12: Gráficos Profundidade (cm) x resistividade (Ohm.m) do primeiro ao nono dia de aquisição de dados.	26
Figura 13: Gráficos Profundidade (cm) x resistividade (Ohm.m) do décimo ao décimo sexto dia de aquisição de dados.	27

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1 TEORIA DO MÉTODO	5
3.2 REVISÃO DE TRABALHOS ANTERIORES	6
3.3 FASES DE DEGRADAÇÃO	8
4. MATERIAS E MÉTODOS	11
4.1 ÁREA DE ESTUDO	11
4.2 MONTAGEM DO EXPERIMENTO E AQUISIÇÃO DE DADOS	14
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	18
6. CONCLUSÕES	22
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	23
ANEXOS	26

1. INTRODUÇÃO

Resíduos sólidos são materiais despejados nas lixeiras pela sociedade. São sobras das atividades diárias do ser humano nas suas casas, no comércio, na indústria e na agricultura. Com o desenvolvimento das cidades e o aumento no consumo de bens e serviços, a geração de resíduos sólidos cresceu rapidamente. Assim, tornou-se necessária uma destinação final ambientalmente adequada para os resíduos. Quando esses são dispostos inadequadamente, geram problemas de saúde pública e acentuam a degradação ambiental, sendo prejudiciais à qualidade de vida das populações. No Brasil, atualmente, as possíveis destinações dos resíduos são incineração, compostagem, disposição em lixões e aterros do tipo controlado ou sanitário. A principal forma de disposição dos resíduos no Brasil são os aterros do tipo sanitário.

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

Desta forma, a resolução CONAMA nº 404, de 11 de novembro de 2008 considera que, em municípios de pequeno porte a implementação e operação de aterro sanitário sofre dificuldades técnicas, operacionais e financeiras. Diante desta dificuldade, estabeleceu-se que municípios com geração diária de até vinte toneladas de resíduos sólidos urbanos os disponham de forma simplificada nos chamados aterros em vala (controlados). Esse tipo de aterro difere dos sanitários, pois não possui impermeabilização, captação de gases, compactação dos resíduos e recobrimento diário dos resíduos dispostos (CONAMA, 2008).

O decreto nº 45.001, de 27 de Junho de 2000 estabelece uma lista de municípios, que estão autorizados a implementar aterros sanitários em valas para resíduos sólidos através de convênios com a Secretaria do Meio Ambiente. O município de Cordeirópolis-SP é o 62º dessa lista (SÃO PAULO, 2000).

De acordo com o Manual de Operação de Aterros Sanitários em Valas 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 deve considerar o tipo de solo e sua permeabilidade, o nível do lençol freático e o excedente hídrico da região (CETESB, 2010).

O aterro é construído através da escavação de valas com dimensões apropriadas, onde os resíduos serão depositados sem compactação e posteriormente cobertos por terra. A não compactação dos resíduos não permite o aproveitamento integral da área aterrada, o que faz com que o procedimento seja inviável para populações com produção de resíduos superiores a 10 t/dia (SMA, 2005).

Segundo a Lei 12.305/2010, os resíduos sólidos podem ser classificados de acordo com a sua origem em urbanos, industriais, de serviço de saúde, rurais e especiais e diferenciados (BRASIL, 2010). Os resíduos sólidos urbanos são definidos como aqueles gerados em residências, domicílios, estabelecimentos comerciais, prestadores de serviços, na limpeza urbana e similares aos produzidos em domicílios. Em aterros em vala apenas são encontrados resíduos urbanos.

A composição genérica dos resíduos sólidos urbanos compreende restos de alimentos, embalagens em geral, cadernos, jornais e revistas, embalagens e utensílios de vidro, pedaços de pano, tecidos, metais, restos de construção, terra, dentre outros. É possível encontrar também contaminantes químicos e biológicos, como latas de tintas, medicamentos, inseticidas, cosméticos, embalagens pressurizadas, lâmpadas, papel higiênico, fraldas descartáveis, absorventes higiênicos, curativos, dentre outros (ZANTA, et al. 2006).

A matéria orgânica presente nos resíduos depositados em aterros sofre processos de decomposição biológicos, químicos e físicos e gera um produto líquido chamado chorume. De cor escura, odor nauseante e elevada demanda bioquímica de oxigênio (DBO), esse líquido é contaminante, pois tem a capacidade de infiltrar no solo podendo atingir o meio

natural, como aquíferos (FERNANDES, et al. 2006). Outro produto da degradação da matéria orgânica são gases, compostos aproximadamente por 50% de metano (CH_4), 40% de dióxido de carbono (CO_2), 9% de nitrogênio, e concentrações residuais de compostos orgânicos voláteis, poluentes perigosos e outros elementos. O metano e dióxido de carbono são gases de efeito estufa, sendo que o primeiro possui potencial de aquecimento global 21 vezes superior ao do dióxido de carbono (SILVA & CAMPOS, 2008).

Diante do panorama apresentado, o presente trabalho propõe a realização de um monitoramento geofísico da pluma de contaminação, por meio de medidas de resistividade elétrica, a partir de cabos instalados numa vala de resíduos no aterro controlado do município de Cordeirópolis (SP). Esta área não possui nenhum sistema de monitoramento para controlar os produtos gerados na decomposição da matéria orgânica contida nos resíduos, como manta de impermeabilização ou drenos para a coleta de chorume ou gases.

Os principais fatores que justificam a realização do presente projeto são a possibilidade de acesso à área mediante autorização da Prefeitura de Cordeirópolis, disponibilidade de recursos financeiros obtidos no edital Programa Primeiro Projetos 2012 (edital UNESP nº10/2010-PROPE), disponibilidade de equipamentos geofísicos junto ao Laboratório de Geofísica do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, proximidade do aterro ao *campus* da UNESP de Rio Claro, possibilidade de instalação do sistema de monitoramento antes do lançamento de resíduos sólidos na vala.

2. OBJETIVOS

O principal objetivo do trabalho é analisar relações entre a variação do parâmetro resistividade elétrica, tempo de residência dos resíduos e influência de chuvas no período, por meio de sistema de monitoramento geofísico em aterro controlado do tipo vala.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 TEORIA DO MÉTODO

A geofísica é uma forma de investigação indireta do subsolo. Ela tem diversas aplicações, inclusive em trabalhos de caracterização e monitoramento ambiental, sendo uma ferramenta eficaz.

A Eletroresistividade é um método geofísico baseado no fato de que diferentes materiais geológicos apresentam diferentes valores de resistividade elétrica. De acordo com o material a ser estudado, sua natureza e estado físico, diferentes valores do parâmetro resistividade elétrica (ρ) são encontrados dependendo da dificuldade encontrada por uma corrente elétrica para se propagar por este material. Fatores como textura, forma e distribuição dos poros no solo e na rocha, mineralogia, umidade, porosidade, líquidos e gases que preenchem os poros do solo e da rocha e processos que ocorrem na estrutura do solo e da rocha condicionam a resistividade dos materiais geológicos (MILSON, 2003).

O método consiste em injetar uma corrente elétrica artificial (I) no solo através de um par de eletrodos metálico, denominados neste trabalho de C_1 e C_2 . Uma diferença de potencial (ΔV) será gerada e medida por outro par de eletrodos (P_1 e P_2), permitindo calcular a resistividade aparente em subsuperfície e, conseqüentemente a resistividade real por meio do processo de inversão (Figura 1).

Conhecendo-se o valor da corrente que percorre o subsolo, denominada de I , a geometria da disposição dos eletrodos, por meio do fator geométrico (K), a diferença de potencial (ΔV) medida pelos eletrodos receptores P_1 e P_2 , é possível calcular a resistividade aparente (ρ_a) de um meio geológico (Equação 1):

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I}$$

Equação 1

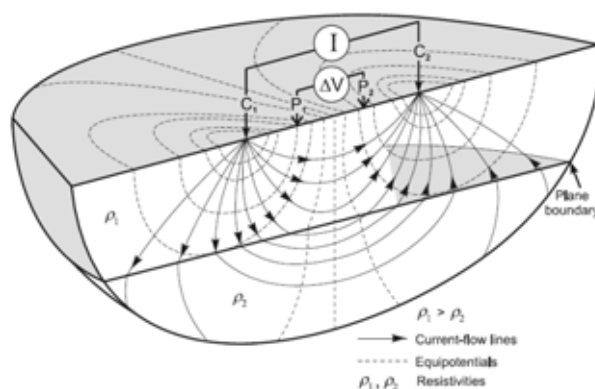


Figura 1 - Princípio da Eletrorresistividade medida com uma matriz de quatro eletrodos.
Fonte: Adaptado de Knodel, K.; Lange, G.; Voigt, H, J (2007).

Existem diversas técnicas de aplicação do método, entre elas a perfilagem, usada no presente trabalho. A perfilagem é uma técnica de prospecção que surgiu na indústria petrolífera, para identificação de jazidas de hidrocarbonetos, desenvolvida em 1927 por H. Doll, os irmãos Schlumberger e outros cientistas. A técnica consiste na instalação na vertical em solo ou rocha de um cabo com sensores que registram a característica do meio, e as transmitem para um aparelho geofísico na superfície capaz de traduzi-las. Hoje a perfilagem é aplicada em diferentes áreas, porém, seu uso associado a métodos geoeletricos para monitoramento ambiental ainda é recente e pouco explorado (ELLIS & SINGER, 2008).

3.2 REVISÃO DE TRABALHOS ANTERIORES

Na literatura científica é possível encontrar diversos trabalhos que relatam a utilização de métodos geofísicos em estudos de contaminação ambiental em áreas de disposição de resíduos. A Eletrorresistividade é usada para diversos estudos, que incluem contaminações provenientes de aterros de resíduos sólidos. Em alguns estudos os resultados são comparados com medidas diretas, que comprovam a eficácia dos resultados do método.

Estudo realizado por Shiraiwa et al. (2002), em Cuiabá (MT), usou os métodos Eletrorresistividade, Eletromagnético no Domínio da Frequência e Radar de Penetração no Solo. O objetivo do estudo foi mostrar os principais problemas do destino final de resíduos

sólidos em depósitos a céu aberto, denominados “lixões”. Assim, foi escolhido como objeto de estudo o “Lixão” de Cuiabá. Os resultados mostraram que através da interpretação integrada de geofísica foi possível caracterizar a área de disposição de resíduos e a pluma de contaminação de chorume e identificaram que essa atinge a zona saturada. Também permitiram localizar a zona de transição solo/rocha, definir a profundidade do topo rochoso e do nível d’água e a espessura do lixo.

Trabalho realizado no município brasileiro de Bauru, no interior do estado de São Paulo, por Lago et al. (2006), apresenta os resultados de medidas de Eletrorresistividade, Polarização Induzida e Potencial Espontâneo, em um aterro de resíduos sólidos urbanos constituído por solo de textura de areia fina a média argilosa. O objetivo foi uma adequada caracterização geoambiental da área utilizada para disposição de resíduos sólidos urbanos no município. Os resultados mostraram que a combinação dos três métodos foi eficaz para atingir o objetivo do trabalho. Eles possibilitaram a identificação da pluma de contaminação e orientaram a locação de ensaios por métodos diretos de investigação, assim como a locação adequada de poços de monitoramento na área.

A partir do método da Eletrorresistividade, Moreira et al. (2009) realizou estudo no município de Cordeirópolis (SP), com o objetivo de verificar a relação entre degradação de resíduos orgânicos e a variação nos parâmetros físicos medidos. A área de estudo compreende um aterro municipal controlado do tipo vala para a deposição apenas de resíduos sólidos domiciliares. Os resultados mostraram áreas com diferentes medidas de resistividades, que foram relacionadas com zonas de concentração ou parcialmente saturadas por chorume e indicam que esse possivelmente atinge a camada de diabásio sotoposta, caracterizado por juntas verticais e, provavelmente, atinge os siltitos da Formação Tatuí. Também mostraram que a degradação de resíduos orgânicos está em atividade. Assim, o método mostrou-se eficaz no entendimento dos processos geoquímicos envolvidos na degradação de resíduos orgânicos.

Em estudo realizado por Oliveira et al. (2010) utilizando o método Polarização Induzida com a técnica do Caminhamento Elétrico, em uma área de disposição de resíduos domiciliares assentado sobre rochas fraturadas, os objetivos consistiram em definição da espessura de resíduos enterrados e a presença de caminhos preferenciais de fluxo associado ao fraturamento do substrato, avaliação do comportamento dos parâmetros físicos medidos

em relação aos resíduos enterrados e o líquido proveniente da degradação de resíduos orgânicos. Os resultados permitiram caracterizar a camada de resíduos sólidos por baixos valores de cargabilidade, em uma condição de nível freático raso definido pelo contato solo/rocha, que corresponde à base da camada de resíduos. O método escolhido demonstrou aplicabilidade em estudos de contaminação inorgânica em terrenos fraturados e houve um contraste claro entre zonas de fratura saturadas em água e possivelmente em chorume e a rocha metamórfica sotoposta.

Trabalho realizado por Bortolin & Malagutti Filho (2010) no aterro controlado de Rio Claro (SP) usou o método da Eletroresistividade e desenvolveu um monitoramento temporal da pluma de contaminação. A comparação dos resultados obtidos durante os anos de 1999 e 2008 permitiu identificar dois sentidos de fluxo da pluma de contaminação e que o fluxo vertical é impedido por uma rocha impermeabilizante constituída predominantemente por siltitos.

3.3 FASES DE DEGRADAÇÃO

Os resíduos depositados em um aterro são passíveis de transformações. O material encontrado na vala possui compostos orgânicos e inorgânicos que sofrem uma superposição de mecanismos biológicos e físico-químicos, catalisados pela água proveniente da umidade e da precipitação no local. Os minerais presentes na massa de resíduos sofrem dissolução, a matéria orgânica é convertida biologicamente em formas solúveis e gasosas e a água carrega finas partículas e material solúvel (CASTILHOS JUNIOR et al. 2003).

De acordo com Gomes et al. (2006), a matéria orgânica é um composto orgânico complexo, transformado em compostos mais simples através da digestão anaeróbia. Diversos fatores podem influenciar a degradação dos resíduos dispostos em aterro sanitário, entre eles o pH, temperatura, presença de nutrientes, ausência de materiais tóxicos, a atividade do sistema, contato entre o material que vai ser degradado e as bactérias e a atividade microbiana de degradação dos diversos componentes presentes na massa de resíduos.

Castilhos Junior et al. (2003) define duas etapas de biodegradação de resíduos sólidos, a etapa aeróbia e a etapa anaeróbia. Sendo que esta ocorre em quatro fases, hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese.

A etapa aeróbia ocorre logo após a deposição dos resíduos. O oxigênio presente nos poros da massa de resíduos permite que organismos aeróbios entrem em atividade e iniciem o processo de biodegradação. As reações são oxi-reduções e são fortemente exotérmicas, gerando água e dióxido de carbono. Essa fase é de curta duração, podendo durar semanas ou até três meses. Com a compactação dos resíduos, o ar atmosférico deixa de penetrar na massa, encerrando a biodigestão anaeróbia e iniciando uma nova etapa de degradação, mais longa e menos energética (RUSSO, 2005).

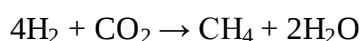
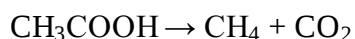
Sem a presença de oxigênio, novos microorganismos anaeróbios passam a realizar a decomposição da matéria orgânica. Eles podem ser divididos em três grupos de bactérias de acordo com seu comportamento fisiológico. O primeiro grupo é responsável pela fase de hidrólise da degradação. O segundo, pela acidogênese. E o terceiro grupo é responsável pelas duas fases finais, a acetogênese e a metanogênese (CASTILHOS JUNIOR et al. 2003).

De acordo com Chernicharo (2007) e Russo (2005), as fases de degradação serão detalhadas abaixo:

- A hidrólise é caracterizada pela conversão de materiais complexos, que não atravessam a parede celular das bactérias, em materiais mais simples, que conseguem realizar essa travessia. Essa conversão é realizada por um grupo de bactérias fermentativas, que excretam enzimas hidrolíticas. Assim, o material orgânico complexo composto por proteínas, carboidratos e lipídios, é transformado em aminoácidos, pequenos sacarídeos, ácidos graxos e álcoois.
- O produto da hidrólise é diretamente usado na acidogênese. Os materiais obtidos na etapa anterior atravessam a parede celular das bactérias e são sintetizados dentro delas. Os compostos passam para uma forma ainda mais simples, como ácidos graxos voláteis, álcoois, gás carbônico e hidrogênio e depois são excretados pelas bactérias.
- A fase acetogênica é responsável pela diminuição do pH dos lixiviados, atingindo valores menores do que 6,5. Isso porque ela usa os produtos da fase

anterior e os sintetiza em ácidos graxos voláteis, hidrogênio e dióxido de carbono. Os valores baixos de pH têm diversos efeitos sobre a biodigestão. Cálcio, ferro e metais pesados atingem grandes concentrações devido à solubilização de materiais inorgânicos. E fortes odores indicam a liberação de gases, como o sulfídrico e amônia.

- É na última etapa, na fase metanogênica, que o metano é liberado. Isto ocorre a partir de dois sub-grupos de bactérias, sendo que o primeiro utiliza ácido acético e metanol como substrato para seu metabolismo e o segundo, hidrogênio e dióxido de carbono e liberam ao final do processo, CH_4 e CO_2 . As principais equações que regem essa fase são:



Todas as fases de biodegradação ocorrem simultaneamente, sendo que durante o processo haverá uma fase predominante. Além disso, o conhecimento da biodegradação, permite associar as etapas de manejo do aterro sanitário com as fases de degradação, procurando reduzir o tempo de estabilização dos resíduos (GOMES et al. 2006).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudos selecionada é o aterro controlado do município de Cordeirópolis, Estado de São Paulo, localizado no Km 4,5 da rodovia Cássio Freitas Levy (Figura 2).

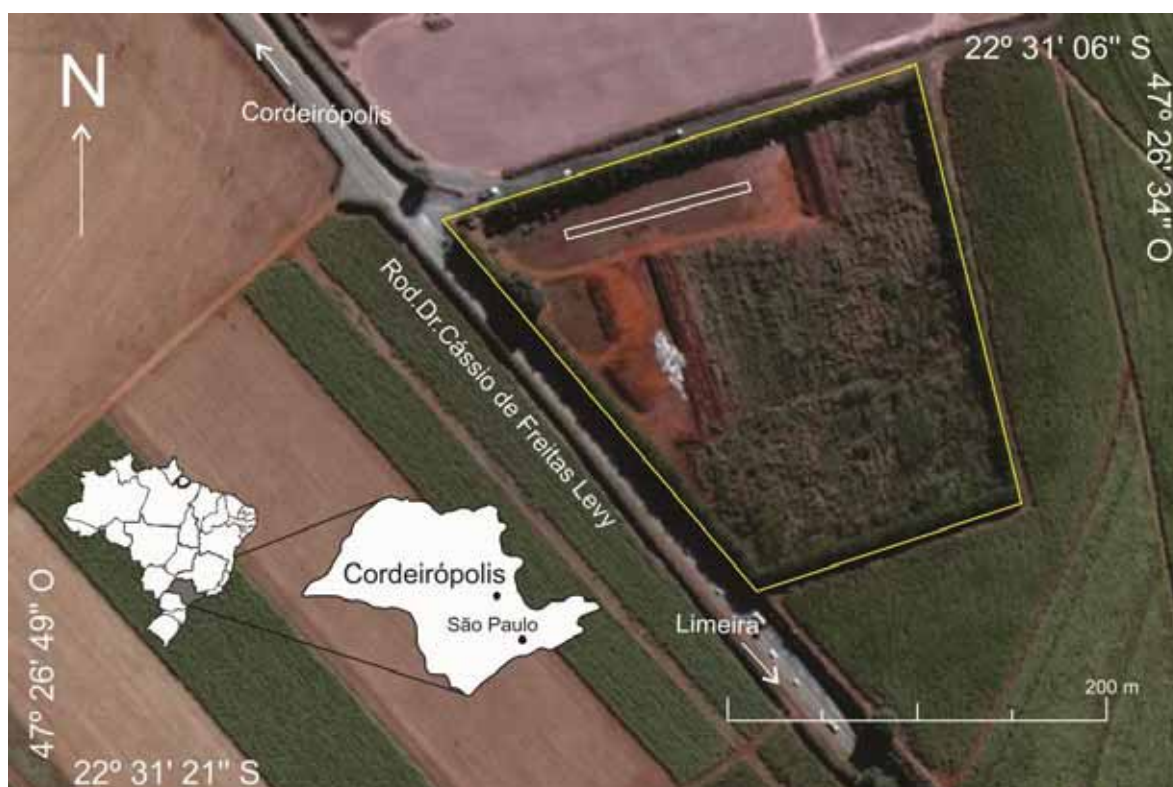


Figura 2 - Localização da área de instalação do dispositivo de monitoramento. Fonte: Adaptado de *Google Earth*.

Os habitantes do município são em aproximadamente 17.000 e a economia é baseada na produção de revestimentos cerâmicos e cultivo de cana-de-açúcar. De acordo com o Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Domiciliares (CETESB 2011), Cordeirópolis produz resíduos sólidos diariamente em uma ordem de 7,7 toneladas.

O local de estudos compreende um aterro controlado do tipo vala, onde são despejados apenas resíduos sólidos domiciliares, operado em valas com 5,0m de profundidade, 4,0m de largura e 90,0m de comprimento, para disposição de resíduos

diretamente sobre o solo e subsequente cobertura com camada de 1,0m de solo. A área disponível é de 48.400m², com início das atividades de 11/2001 e fechamento previsto para 2014 (Figura 3 e Figura 4).

No trabalho de Moreira et al. (2011) foi caracterizado o ambiente geológico da área de estudo. A geologia da área é constituída por um solo argiloso com cerca de 10 m de espessura, sotoposto por uma soleira de diabásio com 10 m de espessura. Abaixo desse ocorrem arenitos finos e siltitos pertencentes à Formação Tatuí. Próximo ao contato com a Formação Tatuí se encontra o nível freático a 50 m de profundidade (Figura 4). Foram realizadas medidas de condutividade hidráulica da zona não-saturada (K_{sat}), por meio de permeâmetro do tipo Ghelph em diversos pontos ao redor do aterro, com medidas que variam de $8,08 \times 10^{-5}$ cm/s a $1,04 \times 10^{-4}$ cm/s, para profundidades de 30 cm. Foi realizado também um peneiramento de amostras de solo de diferentes profundidades. Os dados revelam a predominância da fração argila na composição do solo, que constitui, em média, 70% do intervalo entre 0 a 5 m de profundidade e pela média de 18% da fração silte. Entre 5 e 10 m também predomina a fração argila com média de 80%, seguida pela fração areia fina, com 7% em média.



Figura 3 - Etapas de operação do aterro. (A) Abertura de vala; (B) Descarga de resíduos; (C) Lançamento e cobertura dos resíduos; (D) Valas finalizadas. Fonte: Adaptado de Moreira et al. (2011).

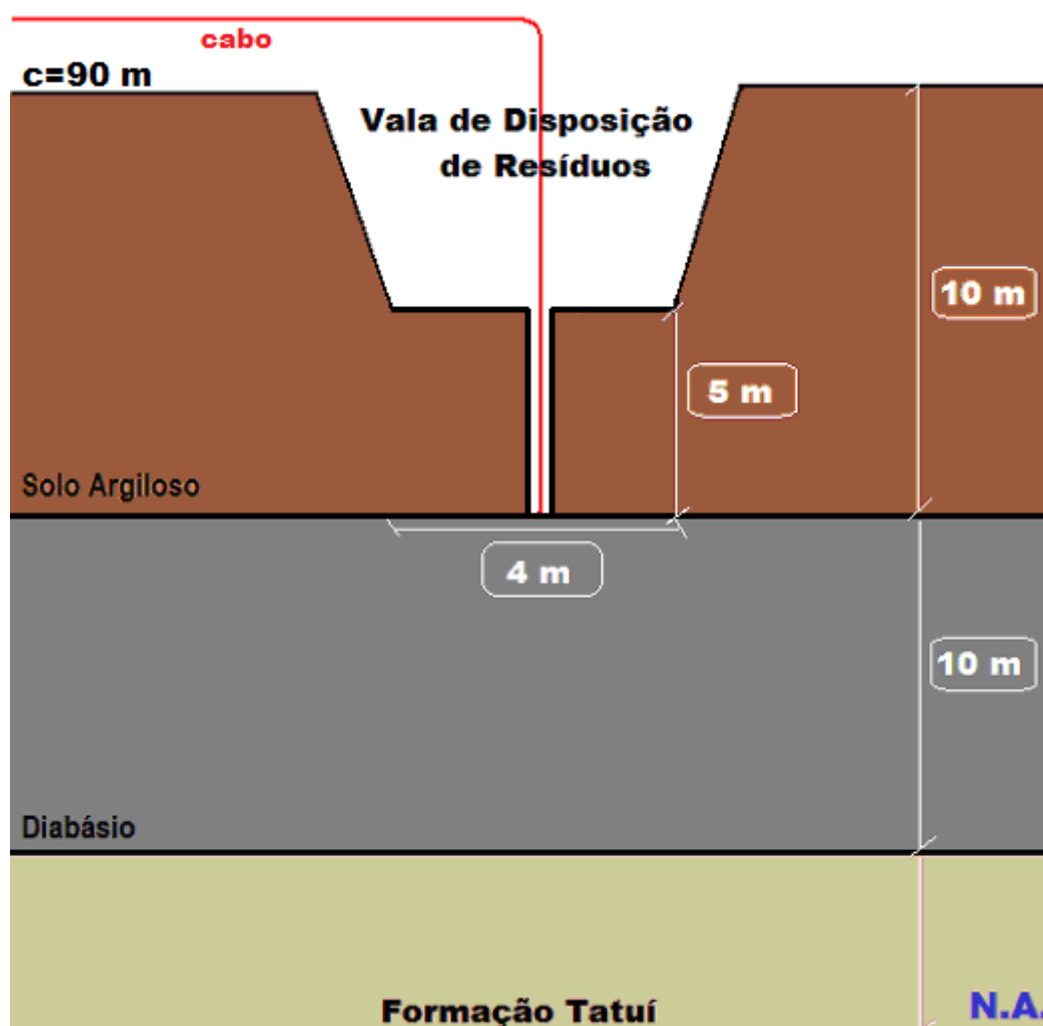


Figura 4 – Perfil da área de estudos, indicando a vala de resíduos sólidos e solo abaixo dela.
Fonte: Autor.

4.2 MONTAGEM DO EXPERIMENTO E AQUISIÇÃO DE DADOS

O experimento foi montado em uma vala no aterro municipal de Cordeirópolis – SP. A vala foi aberta em setembro de 2012 por uma retroescavadeira e possui 5 metros de profundidade, 4 metros de largura e 90 metros de comprimento (Figura 4A).

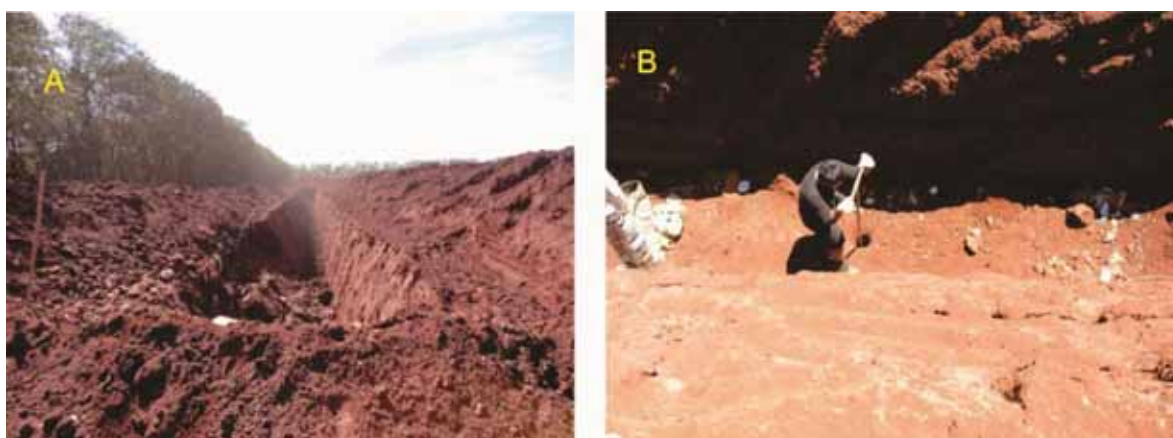


Figura 5 – (A) Vista da vala; (B) Furo a trado manual. Fonte: Autor.

Posteriormente foi iniciada a montagem do experimento geofísico. Para isso foi feito um furo a trado manual de 5m no fundo da vala e um cabo de aproximadamente 10m foi lançado no furo (Figura 4B). O cabo foi previamente preparado com sensores não polarizáveis de grafite, com espaçamento de 40 cm (Figura 5A). Junto ao cabo foi instalado um tubo de PVC ancorado nas laterais da vala para auxiliar sua fixação na vertical (Figura 5B). Os resíduos sólidos foram dispostos cuidadosamente envolta da estrutura e ajudaram sua fixação (Figura 6). Após um mês a vala foi totalmente preenchida e recoberta com solo. Posteriormente iniciou-se a coleta de dados geofísicos.

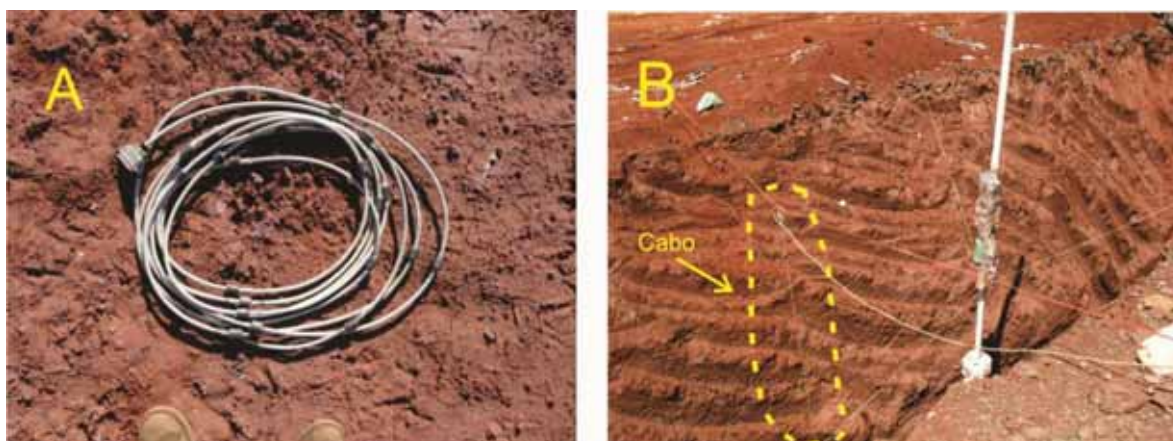


Figura 6 – (A) Cabo com sensores; (B) Tubo de PVC e o cabo âncorados. Fonte: Autor.



Figura 7 – Despejo cuidadoso dos resíduos para não afetar o tubo de PVC e o cabo com sensores. Fonte: Autor.

O equipamento geofísico utilizado para medidas dos parâmetros físicos propostos é o resistivímetro Terrameter SAS 4000, fabricado pela ABEM instrumentos (Suécia), pertencente ao laboratório de Geofísica, vinculado ao Departamento de Geologia Aplicada (DGA), Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE) – UNESP *Campus* de Rio Claro (Figura 7A). As leituras de resistividade foram realizadas em arranjo Werner com espaçamento de 40cm entre sensores.

Os dados geofísicos foram adquiridos quinzenalmente, durante nove meses, do mês de outubro de 2012 a junho de 2013 (Figura 7B). O intervalo amostrado compreende períodos de seca e chuvas. Os dados de precipitação pluviométrica usados no presente trabalho foram adquiridos a cada dez dias e estão disponíveis no site Agritempo (Sistema de Monitoramento Agrometeorológico), que reúne informações de diversas estações meteorológicas de todo o país (AGRITEMPO, 2014).

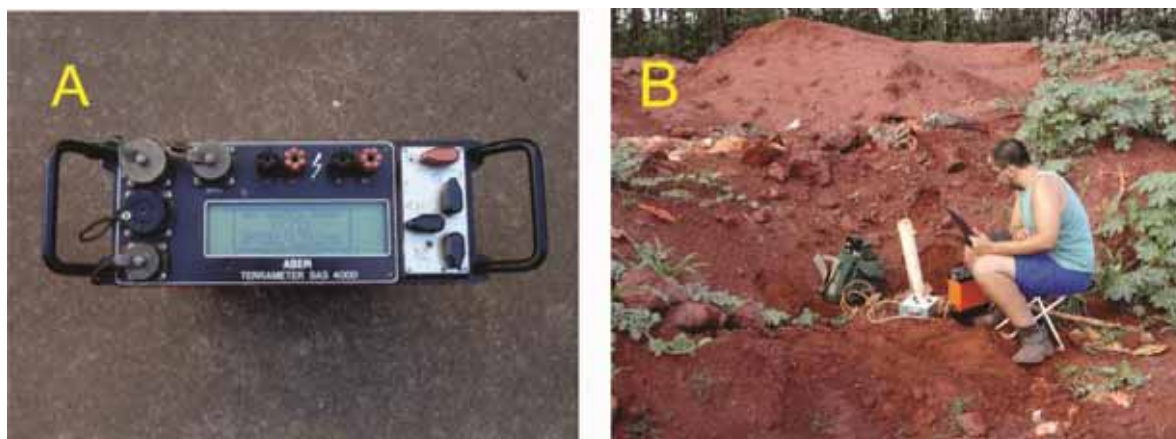


Figura 8 – (A) Foto do Terrameter SAS 4000; (B) Leitura de resistividade elétrica. Fonte: Autor.

Os dados adquiridos foram tabelados no Excel versão 2010 e a partir disso foram gerados gráficos Profundidade (cm) x resistividade (Ohm.m) para cada dia de coleta de dados (Figura 11; Figura 12 - Anexos).

Após a análise dos dados coletados foram escolhidas três profundidades para gerar gráficos Resistividade (Ohm.m) x período (dias) x precipitação (mm), 4,20 metros, 5,80 metros e 9,40 metros de profundidade com o objetivo de identificar as características de percolação do chorume em um aterro em vala. O primeiro dia de coleta foi considerado como dia zero e os dias subsequentes presentes no gráfico condizem com as datas de coleta de dados no campo.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir das medidas de resistividade realizadas em uma profundidade de 4,2m, foi gerado um gráfico, referente a medidas realizadas na massa de resíduos (Figura 8).

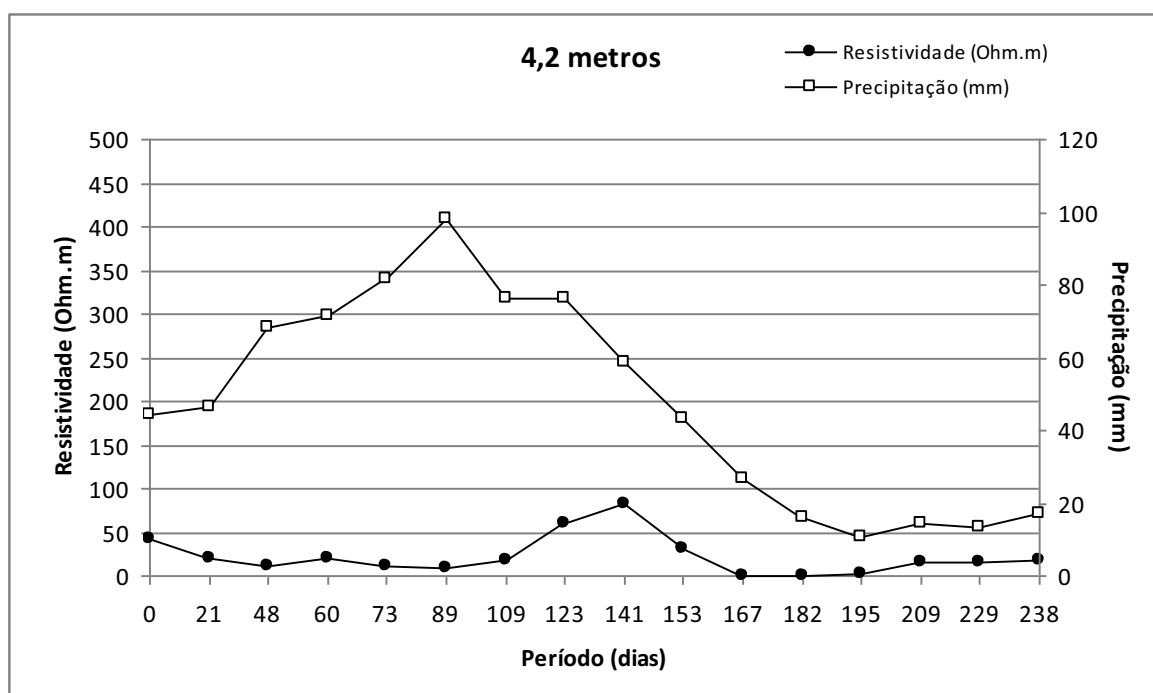


Figura 9 - Medidas realizadas a 4,2m de profundidade.

Do primeiro dia de aquisição de dados ao 21º, a curva de medidas de resistividade apresenta uma leve redução nos seus valores, que permanecem baixos até o 89º dia. Esse período corresponde a um aumento nas medidas de precipitação pluviométrica, atingindo o valor máximo de 100mm no 89º dia.

A degradação da massa de resíduos é influenciada pelo regime de chuvas, pois a água da precipitação pluviométrica, ao atingir a vala, infiltra pela massa de resíduos. Assim, o chorume e a água das chuvas influenciam na umidade do ambiente de degradação. As água provenientes das precipitações no local também influenciam na quantidade e concentração do chorume. Quando a água entra em contato com o chorume, ocorre diluição dos seus teores e permite uma maior quantidade de íons em solução. (MEJU, 2000).

Entre o 89º dia e o 167º dia há um período onde os valores de resistividade aumentam significativamente e depois tornam a cair. Nesse período a precipitação apresenta valores médios, que pode indicar um aumento na produção de gases provenientes da degradação dos resíduos.

Tais gases são caracterizados por apresentarem altos valores de resistividade elétrica. Diversos fatores influenciam na emissão de gases na massa de resíduos, inclusive o regime de chuvas. No estudo Christophersen et al. (2001) é possível relacionar altos valores de precipitação com uma redução na produção de metano. Assim, é preciso que os valores de precipitação não sejam muito altos e nem muito baixos para que haja a produção de gases na vala de resíduos.

A partir das medidas de resistividade realizadas em uma profundidade de 5,8m, foi gerado um gráfico, referente a medidas realizadas no solo abaixo da vala de resíduos, distante 80cm do fundo da vala (Figura 9).

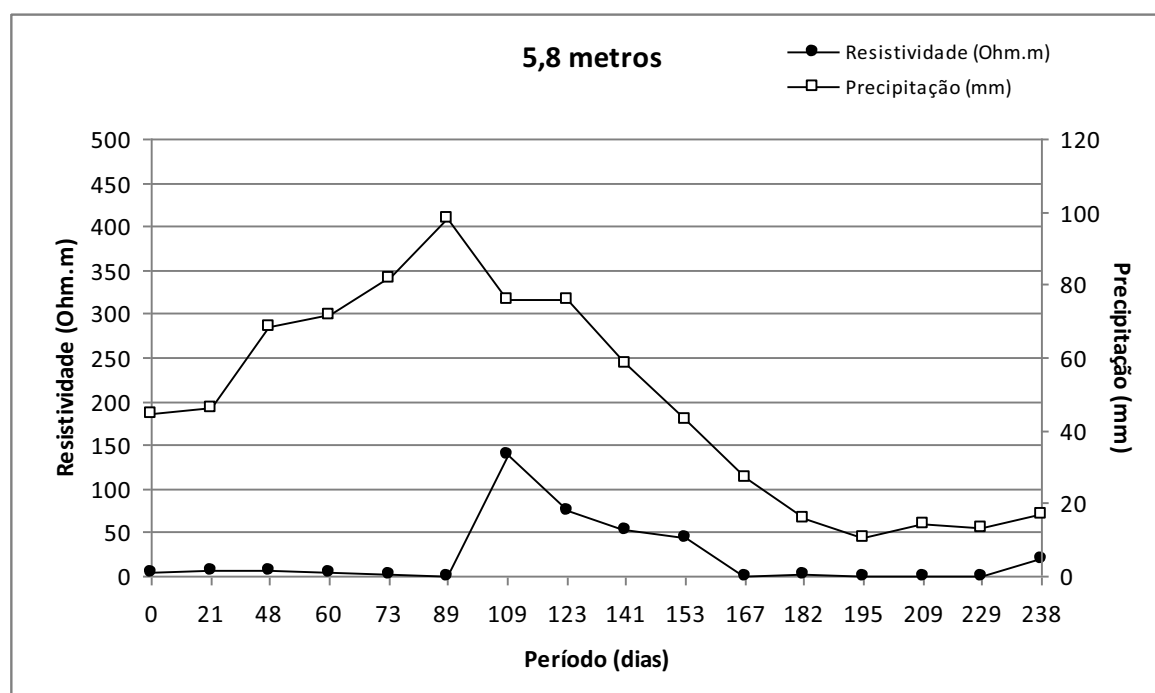


Figura 10 –Medidas realizadas a 5,8m de profundidade.

Os valores de resistividade elétrica permanecem baixos do primeiro ao 89º dia. Esse período corresponde a elevados valores de precipitação e elevada produção de chorume. O

chorume é caracterizado por ser menos resistivo que o meio geológico natural e a massa de resíduos, pois possui íons em solução. A tendência do chorume é percolar pela massa de resíduos e atingir o solo abaixo da vala. Quando o chorume entra em contato com o solo, ele dilui os íons minerais, adquirindo mais íons em concentração. (FARQUHAR & ROVERS, 1973; FARQUHAR, 1989; MEJU, 2000).

Altas concentrações iônicas em solução geram condições de saturação que levam à precipitação de íons que causam um desequilíbrio geoquímico, gerando neoformações minerais, que são caracterizadas por apresentarem valores mais altos de resistividade (FARQUHAR, 1989). A curva de resistividade entre os dias 89° e 167° pode indicar esse comportamento. Primeiro há um rápido aumento de medidas de resistividade elétrica, que pode ser relacionado com a precipitação de íons, do 89° ao 109° dias. Posteriormente à precipitação dos íons, o líquido que percola no meio geológico readquire sua capacidade de assimilar íons e, assim, volta a apresentar baixos valores de resistividade.

A partir das medidas de resistividade realizadas em uma profundidade de 9,4m, foi gerado um gráfico, referente a medidas realizadas no solo abaixo da vala, distante 4,4m do fundo da vala de resíduos e próximo à soleira de diabásio (Figura 10).

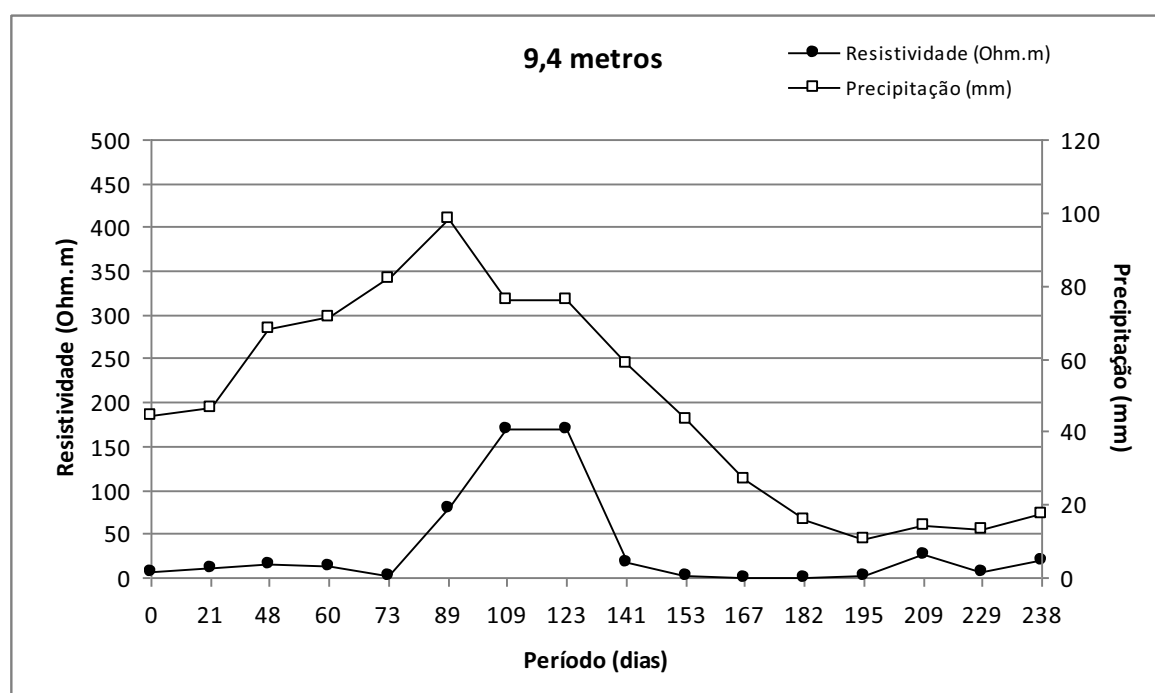


Figura 11 – Medidas realizadas a 9,4m de profundidade.

O padrão descrito para os dados adquiridos a 5,8m de profundidade é semelhante aos dados para 9,4m. Entre o primeiro e o 73º dia de monitoramento, há um período de baixas resistividade e altas precipitações, caracterizado pela infiltração de chorume no solo abaixo da vala de resíduos. Do 73º ao 153º dia ocorre a saturação do líquido percolado e a precipitação de íons e posteriormente o retorno da capacidade do líquido de assimilar íons.

A amplitude da curva de resistência elétrica para a profundidade de 5,8m atinge 150 Ohm.m e a amplitude para a profundidade de 9,4 metros atinge 170 Ohm.m. Além disso o aumento nos valores de resistividade elétrica ocorre no 73º dia para a profundidade de 9,4m e no 89º dia para 5,4m.

Isso ocorre provavelmente devido à diferença na influência da umidade com o aumento da profundidade. O solo no local de estudo apresenta condutividade hidráulica saturada $1,04 \times 10^{-4}$ cm/s a $8,08 \times 10^{-5}$ cm/s, ou seja, a velocidade de percolação de líquidos é lenta. Assim, a umidade no solo tende a diminuir com a profundidade. A umidade é caracterizada por apresentar baixos valores de resistividade (MEJU, 2000). Sendo assim, na profundidade de 9,4m, a influência da umidade é menor, caracterizando maiores valores de resistividade.

6. CONCLUSÕES

A montagem do sistema necessita da ausência inicial de resíduos na vala e é algo relativamente trabalhoso, além de deslocamentos constantes até o aterro para aquisição de dados. Porém, o método geofísico Eletrorresistividade foi eficaz no monitoramento de contaminação por decomposição de resíduos dispostos no solo.

Na ausência de sistemas de monitoramento ambiental, como drenos de gás e manta impermeabilizadora, a perfilagem geofísica demonstrou eficácia como procedimento na análise de infiltração de chorume em horizontes de solo abaixo de valas de resíduos permeáveis.

Esta pesquisa demonstra que o parâmetro físico resistividade elétrica foi sensível a variações relacionadas à produção de chorume e infiltração de águas de chuva. A diferença de resistividade elétrica entre o material geológico natural e o meio contaminado por chorume permitiu um estudo indireto e pouco invasivo, através da geofísica.

O método foi sensível a variações de umidade na massa de resíduos e no solo abaixo da vala. As variações de resistividade elétrica refletem tanto a infiltração de água das chuvas, quanto de chorume, pois ambos os fatores influenciam na umidade do ambiente de degradação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos**. NBR 8419. São Paulo: 1992.
- AGRITEMPO – Sistema de Monitoramento Agrometeorológico. **Dados de precipitação da estação Limeira CESET/UNICAMP**. Disponível em <<http://www.agritempo.gov.br/agritempo/jsp/PesquisaClima/index.jsp?siglaUF=SP>>.
- Acesso em 11 de março de 2014.
- BORTOLIN, J.R.M.; MALAGUTTI FILHO, W. **Método da Eletorresistividade aplicado no monitoramento temporal da pluma de contaminação em área de disposição de resíduos sólidos urbanos**. ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, v.15 n° 4, 2010, p. 367-374.
- BRASIL. **Política Nacional dos Resíduos Sólidos**. Lei número 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos. Brasília, DF, Presidência da República, 2010.
- CASTILHOS JR, A. B.; MEDEIROS, P. A.; FIRTA, I. N.; LUPATINI, G.; SILVA, J. D. Principais Processos de Degradação de Resíduos Sólidos Urbanos, IN: **Alternativas para disposição de resíduos sólidos urbanos para pequenas comunidades** / Armando Borges Castilhos Junior (coordenador). Florianópolis: ABES, 2003, L 280 p.
- CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. 2011. **Inventário estadual de resíduos sólidos domiciliares**. São Paulo, CETESB, Série Relatórios, 218 p.
- CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. 2010. **Manual de operação de aterro sanitário em valas**. São Paulo, CETESB, 24 p.
- CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores Anaeróbios**. 2. ed. Belo Horizonte. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, v. 5, 2007, 377p.
- CHRISTOPHERSEN, M.; KJELDSEN, P.; HOLST, H.; CHANTON, J. Lateral gas transport in soil adjacent to an old landfill: factors governing emissions and methane oxidation. **Waste Management & Research**. n° 19. p 595-612, 2001.
- CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente (2008). **Resolução nº 404, de 11 de novembro de 2008**. Ministério do Meio Ambiente.

- ELLIS, D. V.; SINGER, J. M. **Well Logging for Earth Scientists**. Dordrecht: Springer, 2008, 692 p.
- FARQUHAR, G. J. **Leachate: production and characterization**. Canadian Journal of Civil Engineering, 1989, 16: 317–325.
- FARQUHAR, G. J.; ROVERS, F. A. **Gas production during refuse decomposition**. Water, Air and Soil Pollution, 1973, 2(10): 483-499.
- FERNANDES, F.; COSTA, R. H. R.; GOMES, L. P.; FERREIRA, J. A.; BEAL, L. L.; JUNIOR, A. B. C.; SILVA, S. M. C. P.; CAMPOS, J. C.; LOPES, D. D.; BOFF, R. D.; SILVA, J. D. Tratamento Biológico de Lixiviados de Resíduos Sólidos Urbanos, IN: **Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos com ênfase na proteção de corpos d'água: prevenção, geração e tratamento de lixiviados de aterros sanitários** / Armando Borges Castilhos Junior (coordenador). Rio de Janeiro: ABES, 2006, 494 p.
- GOMES, L. P.; LANGE, L. C.; JUCÁ, J. F. T.; FERNANDES, F.; SILVA, S. M. C. P. Processos e Monitoramento da Digestão Anaeróbia de Resíduos Sólidos Urbanos, IN: **Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos com ênfase na proteção de corpos d'água: prevenção, geração e tratamento de lixiviados de aterros sanitários** / Armando Borges Castilhos Junior (coordenador). Rio de Janeiro: ABES, 2006, L 494 p.
- KNODEL, K.; LANGE, G.; VOIGT, H. J. **Environmental Geology - Handbook of Field Methods and Case Studies**. Springer-Verlag, Berlin, 2007, 1374 p.
- 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, v. 24(3), 2006, 18 p.
- MEJU, M. A. **Geoelectrical investigation of old/abandoned, covered landfill sites in urban areas: model development with a genetic diagnosis approach**. Journal of Applied Geophysics, 2000, 44: 115–150.
- MILSON, J. **Field Geophysics**. Wiley, England, 2003, 232 p.
- MOREIRA, C.A.; BRAGA, A. C. O.; FRIES, M. **Degradação de resíduos e alterações na resistividade elétrica, pH e Eh**. Revista Brasileira de Geofísica, v. 27(2). 2009, p. 283-293.

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, v. 41(3). 2011, p. 549-557.

OLIVEIRA, M. T.; MOREIRA, C. A.; MENEZES, A. M. C. **Aplicação do método de polarização induzida em área de disposição de resíduos sólidos no município de Caçapava do Sul – RS.** Revista Brasileira de Geofísica, v. 29 (2), 2010, 8p.

RUSSO, M. A. T. **Avaliação dos processos de transformação de resíduos sólidos urbanos em aterro sanitário.** Tese de doutorado, Escola de Engenharia da Universidade do Minho. Portuga: Maio, 2005.

SÃO PAULO. **Decreto nº45.001, de 27 de junho de 2000.** Secretaria do Meio Ambiente.

SILVA,T. N.; CAMPOS, L. M. S. **Avaliação da produção e qualidade do gás de aterro para energia no Aterro Sanitário dos Bandeirantes – SP.** ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, v.13 n.1, 2008, p. 88-96.

SHIRAIWA, S.; LISOVSKY, S. P.; ELIS, V. R.; PORSANI, J. L.; BORGES, W. R. **Estudos geofísicos integrados no lixão de Cuiabá-MT – Resultados Preliminares.** Brazilian Journal of Geophysics, Vol. 20 (3), 2002, 6p.

SMA - Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo. 2005. **Procedimentos para implantação de Aterro Sanitário em Vala.**

ZANTA, M. V.; MARINHO, M. J. M. R.; LANGE, L. C.; PESSIN, N. Resíduos Sólidos, Saúde e Meio Ambiente: Impactos Associados aos Lixiviados de Aterro Sanitário, IN: **Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos com ênfase na proteção de corpos d'água: prevenção, geração e tratamento de lixiviados de aterros sanitários** / Armando Borges Castilhos Junior (coordenador). Rio de Janeiro: ABES, 2006,L 494 p.

ANEXOS

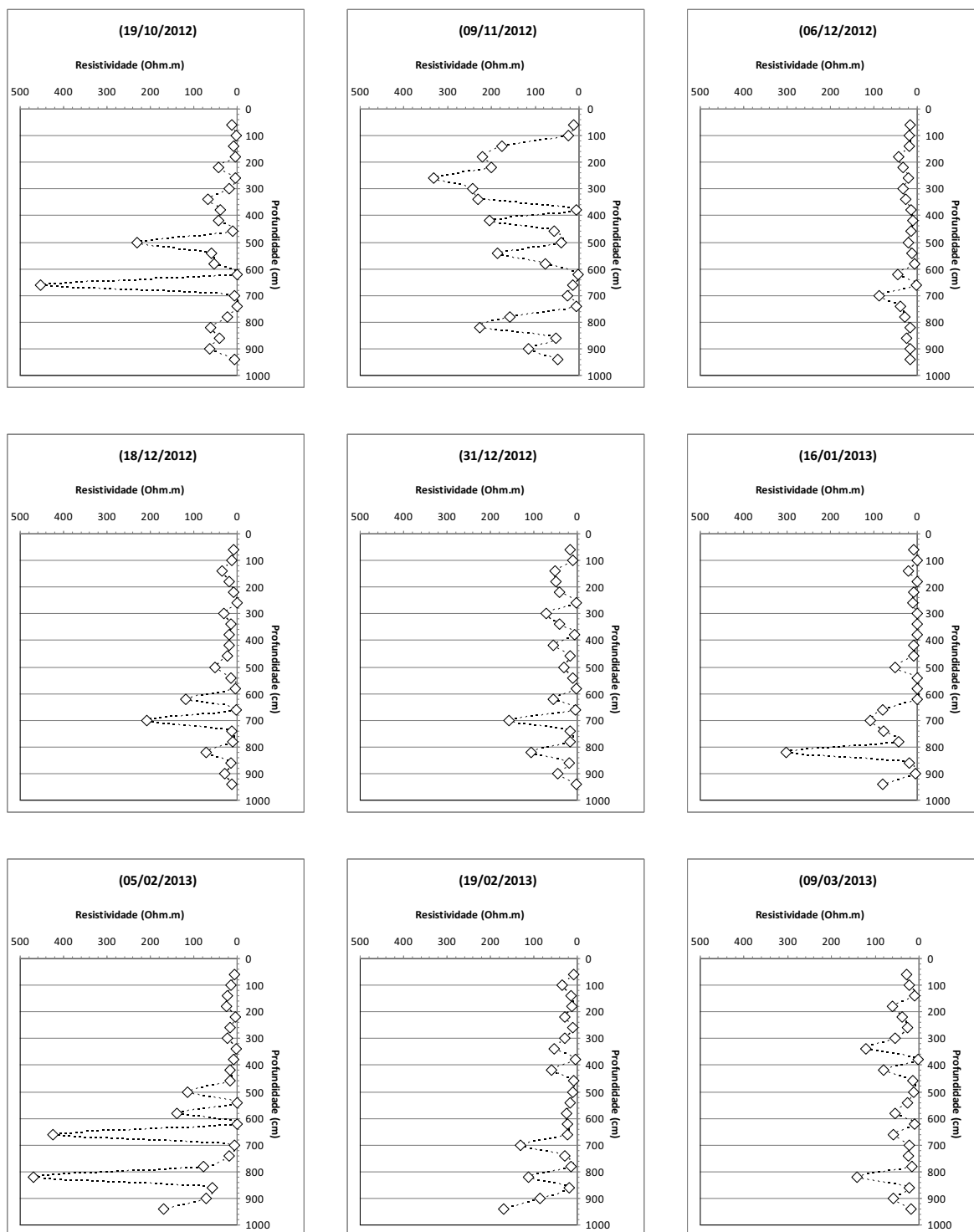


Figura 12: Gráficos Profundidade (cm) x resistividade (Ohm.m) do primeiro ao nono dia de aquisição de dados.

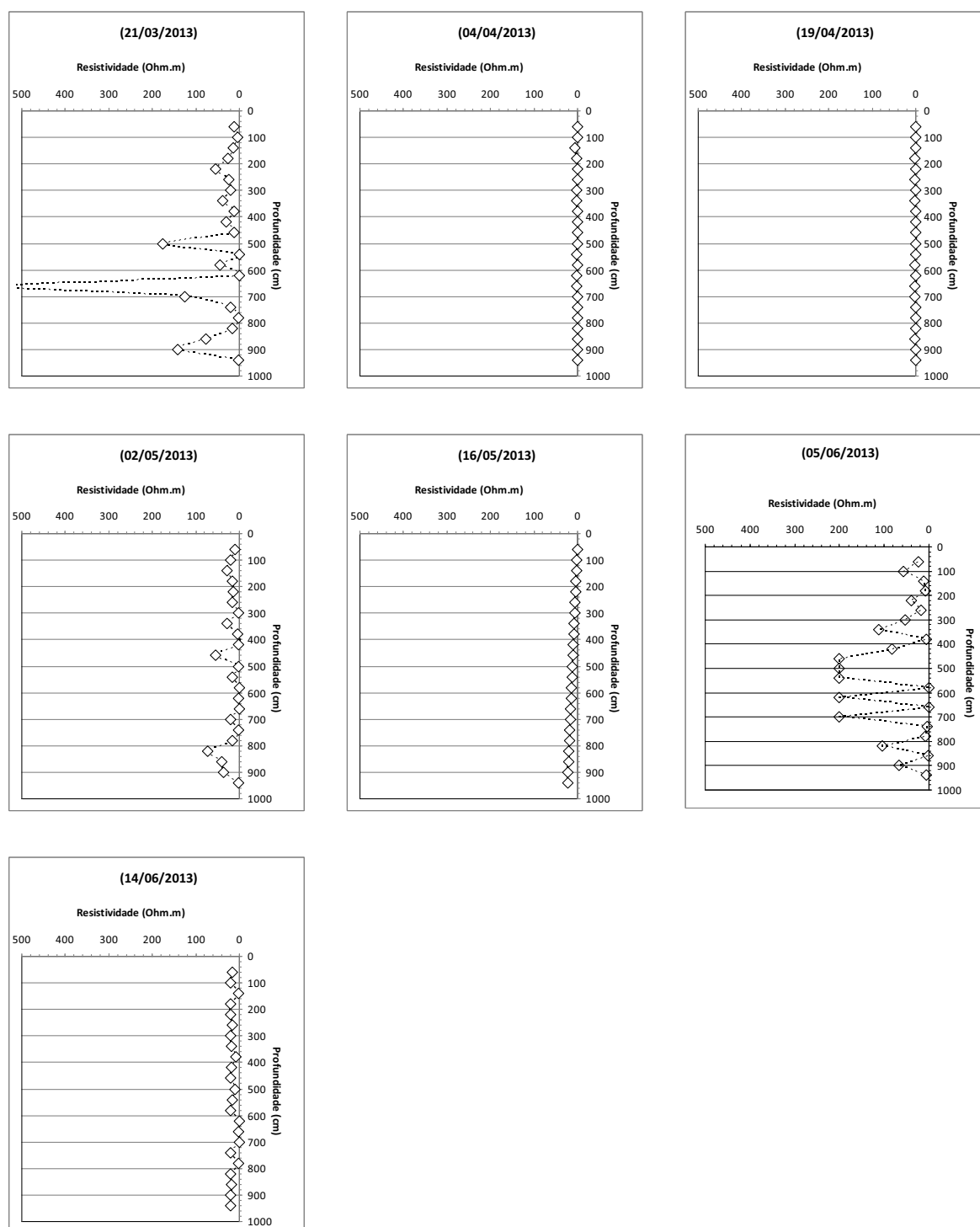


Figura 13: Gráficos Profundidade (cm) x resistividade (Ohm.m) do décimo ao décimo sexto dia de aquisição de dados.