

Trabalho de Formatura

Curso de Graduação em Geologia

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE ARRANJOS DE IMAGEAMENTO
ELÉTRICO NO MODELAMENTO DE PLUMA DE CONTAMINAÇÃO E CONE
DE DEPRESSÃO**

Júlio César da Silva

Prof. Dr. César Augusto Moreira

Rio Claro (SP)

2015

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Campus de Rio Claro

JÚLIO CÉSAR DA SILVA

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE ARRANJOS DE
IMAGEAMENTO ELÉTRICO NO MODELAMENTO DE
PLUMA DE CONTAMINAÇÃO E CONE DE DEPRESSÃO

Trabalho de Formatura de Curso 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

2015

551
S586a Silva, Julio Cesar da
 Análise comparativa entre arranjos de imageamento elétrico no
 modelamento de pluma de contaminação e cone de depressão / Julio Cesar
 da Silva. - Rio Claro, 2015
 43 f. : il., figs.

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

 1. Geofísica. 2. Imageamento elétrico. 3. Dipolo-dipolo. 4.
 Schlumberger. 5. Wenner. I. Título.

JÚLIO CÉSAR DA SILVA

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE ARRANJOS DE
IMAGEAMENTO ELÉTRICO NO MODELAMENTO DE
PLUMA DE CONTAMINAÇÃO E CONE DE DEPRESSÃO

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. João Carlos Dourado

Rio Claro, 17 de dezembro de 2015.

Assinatura do(a) aluno(a)

Assinatura do(a) orientador(a)

*“Às vezes a felicidade demora a chegar
Aí é que a gente não pode deixar de sonhar
Guerreiro não foge da luta e não pode correr
Ninguém vai poder atrasar quem nasceu pra
vencer”*

(Xande de Pilares)

RESUMO

O presente trabalho realiza uma análise comparativa entre os arranjos Dipolo-dipolo, Wenner e Schlumberger por meio de ensaios de tomografia elétrica (ERT), quanto à sensibilidade e resolução na caracterização espacial de poluentes infiltrados em fossa séptica e de cone de depressão em poço de captação de água, ambos contidos em aquífero livre. A aquisição de dados foi realizada no campus da Universidade Estadual Paulista – UNESP localizado no município de Rio Claro e consistiu em leituras de resistividade elétrica por meio de cinco linhas paralelas, com 105m de comprimento, espaçamento entre eletrodos e linhas de 5m. Os dados de cada linha foram submetidos a inversão 2D, posteriormente interpolados para geração de blocos 3D, a partir do qual foi extraído uma isosuperfície de resistividade fixa (620 Ω .m), que possibilitou o modelamento de volumes relacionados as estruturas de fluxo. Os resultados para o arranjo Dipolo-dipolo permitiram o modelamento de estrutura cilíndrica associada ao poço, além de uma deformação de isosuperfície associada a fossa, mas que não possibilitou o modelamento da pluma. Os dados para o arranjo Schlumberger não permitem o reconhecimento do cone, mas resultaram num modelo em formato de gota associado à fossa, semelhante a uma pluma de contaminação. O arranjo Wenner resultou num modelo com estrutura em formato de quilha alongada, associada ao cone de depressão, e outra em formato semelhante de gota, também associada a fossa. A análise comparativa permite concluir que o arranjo Dipolo-dipolo é recomendado em trabalhos de modelamento de estruturas tridimensionais verticalizadas de alta resistividade em zona saturada. Os arranjos Wenner e Schlumberger são recomendáveis ao modelamento de estruturas tridimensionais verticalizadas de baixa resistividade em zona não saturada, com ênfase para o arranjo Schlumberger.

Palavras-chave: Dipolo-dipolo, Schlumberger, Wenner, pluma de contaminação, cone de depressão.

ABSTRACT

This paper makes a comparative analysis between the Dipole-dipole, Wenner and Schlumberger arrays through electric resistivity tomography (ERT), as the sensitivity and resolution in the spatial characterization of infiltrating pollutants in septic tank and cone of depression in well water, both contained in unconfined aquifer. Data acquisition consisted of electrical resistivity readings using five parallel lines with 105m long, electrode spacing and lines of 5m. The data from each line were subjected to 2D inversion, then interpolated to generate 3D blocks, which was extracted from a fixed resistivity isosurface ($620 \Omega.m$), which enabled the modeling of volumes related the flow structures. The results for the Dipole-dipole array allowed the modeling of the cylindrical structure associated the well water, and an isosurface deformation associated septic tank, but did not allow the modeling of the plume. The data for the Schlumberger array cannot be recognized cone, but resulted in a drop shape model, associated with septic tank and similar to a contamination plume. The Wenner array resulted in a model with structure in elongated keel format associated with the cone of depression, and another that is similar drop shape model similar to a contamination plume. The comparative analysis shows that the Dipole-dipole array is recommended in works of modeling vertically integrated three-dimensional structures of high resistivity in the saturated zone. The Wenner and Schlumberger arrays are recommended to modeling vertically integrated three-dimensional structures of low resistivity in the unsaturated zone, with emphasis on the Schlumberger array.

Keywords: Dipole-dipole, Schlumberger, Wenner, contamination plume, cone of depression.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Localização da área de estudos, com destaque para os alvos investigados. | 14 |
| Figura 2. Aquífero livre e confinado. | 19 |
| Figura 3. Formas e tamanhos distintos de plumas. | 22 |
| Figura 4. Circuito elétrico de resistividade de um meio homogêneo em subsuperfície. | 25 |
| Figura 5. Esquema de aquisição utilizando o arranjo D-D. | 28 |
| Figura 6. Arranjo Wenner com espaçamento constante entre os eletrodos. | 28 |
| Figura 7. Disposição dos eletrodos do arranjo Schlumberger. | 29 |
| Figura 8. Linhas de tomografia elétrica. | 30 |
| Figura 9. Resistivímetro Terrameter LS. | 31 |
| Figura 10. Modelo de inversão para o arranjo Schlumberger. | 33 |
| Figura 11. Blocos em 3D das superfícies de resistividade interpoladas. | 34 |
| Figura 12. Modelo de dispersão gravitacional da pluma e do cone. | 35 |
| Figura 13. Superfícies 3D de isovalores de 620 Ω .m para os arranjos de aquisição. | 36 |
| Figura 14. Seções de sensibilidade normalizadas para os arranjos em estudo. | 38 |
| Figura 15. Modelo de inversão para o arranjo Dipolo-Dipolo. | 43 |
| Figura 16. Modelo de inversão para o arranjo Schlumberger. | 44 |
| Figura 17. Modelo de inversão para o arranjo Wenner. | 45 |
| Figura 18. Modelo de inversão para a linha número um do arranjo Dipolo-Dipolo. | 46 |
| Figura 19. Modelo de inversão para a linha número dois do arranjo Dipolo-Dipolo. | 46 |
| Figura 20. Modelo de inversão para linha número três do arranjo Dipolo-Dipolo. | 47 |
| Figura 21. Modelo de inversão para a linha número quatro para o arranjo Dipolo-Dipolo. | 47 |
| Figura 22. Modelo de inversão para a linha cinco do arranjo Dipolo-Dipolo. | 48 |
| Figura 23. Modelo de inversão para linha um do arranjo Schlumberger | 48 |

| | |
|--|----|
| Figura 24. Modelo de inversão para a linha dois do arranjo Schlumberger. | 49 |
| Figura 25. Modelo de inversão para a linha número três do arranjo Schlumberger. | 49 |
| Figura 26. Modelo de inversão da linha quatro do arranjo Schlumberger. | 50 |
| Figura 27. Modelo de inversão da linha cinco do arranjo Schlumberger. | 50 |
| Figura 28. Modelo de inversão da linha um do arranjo Wenner. | 51 |
| Figura 29. Modelo de inversão da linha dois do arranjo Wenner. | 51 |
| Figura 30. Modelo de inversão da linha três do arranjo Wenner. | 52 |
| Figura 31. Modelo de inversão da linha quatro do arranjo Wenner | 52 |
| Figura 32. Modelo de inversão da linha cinco do arranjo Wenner. | 53 |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS..... | 10 |
| 2. OBJETIVO | 12 |
| 3. ÁREA DE ESTUDOS..... | 13 |
| 4. GEOLOGIA REGIONAL | 15 |
| 4.1. Geologia local | 16 |
| 5. HIDROGEOLOGIA | 18 |
| 5.1. Aquíferos Livres..... | 18 |
| 5.1.1. <i>Aquífero Rio Claro</i> | <i>19</i> |
| 6. CONTAMINANTES | 21 |
| 6.1. Pluma de Contaminação | 21 |
| 6.1.2. <i>Gerenciamento de Áreas Contaminadas.....</i> | <i>22</i> |
| 7. GEOFÍSICA..... | 24 |
| 7.1. Método da Eletrorresistividade | 24 |
| 7.1.1. <i>Classificação das Modalidades Geométricas.....</i> | <i>26</i> |
| 7.1.2. <i>Arranjos de Eletrodos.....</i> | <i>27</i> |
| 7.1.3. <i>Arranjo Dipolo-Dipolo.....</i> | <i>27</i> |
| 7.1.4. <i>Arranjo Wenner.....</i> | <i>28</i> |
| 7.1.5. <i>Arranjo Schlumberger.....</i> | <i>29</i> |
| 8. MATERIAIS E MÉTODOS | 30 |
| 9. RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 33 |
| 10. CONCLUSÕES | 41 |
| ANEXOS | 43 |
| REFERÊNCIAS | 54 |

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS

A disponibilidade de recursos hídricos é algo que requer uma atenção cada vez maior por parte do gerenciamento público, diante do aumento da demanda e de uma oferta cada vez mais restrita em termos de qualidade, acessibilidade e vazões proporcionadas por recursos hídricos superficiais.

A matriz energética brasileira é historicamente baseada na geração de eletricidade em desníveis proporcionados por barragens, que dentre muitos outros objetivos, também representam um recurso disponível ao abastecimento público (MME, 2013). Num contexto de longos períodos de estiagem, como no caso atual na região sudeste do Brasil, é natural o surgimento de um impasse acerca das necessidades energéticas e de abastecimento público.

Em outra vertente, é ainda incipiente a adoção de medidas que visem mitigar questões como o desperdício em vazamentos nas redes de distribuição, ligações clandestinas ou o reuso de águas provenientes do tratamento de esgoto em atividades específicas. Este conjunto de fatores indica um cenário de racionamento energético e de abastecimento público.

O recurso hídrico subterrâneo é sempre uma alternativa considerada em muitos casos, preferencialmente em municípios onde a disponibilidade do recurso superficial é escassa ou ocorre de forma complementar a captação superficial (BALEK, 1989). Particularmente relevante em termos econômicos, à captação subterrânea é um recurso bastante explorado pelas atividades industriais e pelas comunidades localizadas a grandes distâncias dos sistemas de distribuições de água (ELGZELI *et al.*, 2013; HISCOCK, 2009).

A ausência ou escassez de sistemas de coleta e tratamento de esgotos e efluentes líquidos, bem como também o seu lançamento direto em rios e lagos resultam no impacto direto do recurso superficial. Entretanto, em locais nos quais este procedimento é economicamente inviável, o uso de fossas sépticas é ainda uma alternativa bastante utilizada (NEMEROW *et al.*, 2009). A pequena visibilidade deste procedimento e a hipótese de depuração pela filtração proporcionada no ambiente geológico resultam em seu uso indiscriminado e desprovido de quaisquer planejamentos ou procedimentos técnicos (KÖNIG; WEISS, 2009).

A carga de poluentes eventualmente presentes em córregos e rios é bastante atenuada em períodos de chuva, no qual o aumento das vazões possibilita a diluição de efluentes líquidos (MATHEW *et al.*, 2011). Contudo, o aporte deste tipo de poluente em solos e aquíferos, seja de forma acidental ou proposital resultam em impactos de longo prazo devido

ao elevado tempo de residência pela velocidade de fluxo que é proporcionalmente menor neste ambiente (PEIRCE; VESILIND; WEINER, 1998; SARA, 2003).

Obviamente, é essencial o uso de procedimentos técnicos que impeçam este tipo de impacto, além do desenvolvimento e aperfeiçoamento de tecnologias que possibilitem o diagnóstico e o monitoramento de situações em curso (HERNÁNDEZ-SORIANO, 2014; LJHT et al., 2002; TWARDOWSKA; ALLEN; HAGGLOM, 2006).

O uso de métodos geofísicos é uma possibilidade racional neste contexto, diante de fatores como a sensibilidade de mensuração indireta de parâmetros físicos alteráveis em presença de poluentes em solo e águas subterrâneas, a ampla cobertura para investigação em termos espaciais e a possibilidade de monitoramento de forma rápida a um custo relativamente reduzido, quando comparado a técnicas tradicionais como a instalação e as amostragens em poços de monitoramento (KNÖDEL; LANGE; VOIGT, 2007; SARA, 2003).

Neste sentido, o presente trabalho apresenta e discute os resultados de aplicação do método geofísico da Eletrorresistividade, numa área com presença de uma fossa séptica a montante de um poço de captação subterrânea para abastecimento público. Neste local foram realizados ensaios de tomografia elétrica (ERT) em arranjos Dipolo-dipolo, Wenner e Schlumberger.

2. OBJETIVO

O principal objetivo é uma análise do arranjo geométrico (Dipolo-Dipolo, Wenner e Schlumberger) mais adequado em termos de sensibilidade e resolução, na detecção de poluentes infiltrados em fossa e a identificação do cone de depressão em sistema de captação subterrânea.

3. ÁREA DE ESTUDOS

A coleta de dados geofísicos realizada no campus da Universidade Estadual Paulista – UNESP, no município de Rio Claro (SP), 190Km a sudoeste da capital do Estado. O local consiste num terreno anexo a um conjunto de três prédios didáticos construídos em 2005, com sistema de esgotamento sanitário que conduz por gravidade toda água proveniente dos banheiros, sentido a uma fossa séptica localizada no extremo NW do conjunto. Em 2010 foram realizadas perfurações e instalações de redes interligadas de poços de captação subterrânea em diversos pontos do campus, dentre os quais um poço localizado a 40m a jusante da fossa séptica, sentido SSW (Figura 1).

O poço possui 20m de profundidade e apresentou nível freático posicionado a 12,3m durante a realização dos ensaios geofísicos, com produção de $8\text{m}^3/\text{h}$. Ensaios desenvolvidos por Oliva *et al.* (2005), a poucas dezenas de metros do local de estudo, revelam valores de condutividade hidráulica para 2m de profundidade de $9,6 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ e de $6 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ para 14m de profundidade (zona saturada).

A fossa séptica localizada na área de estudos possui 2m de diâmetro e 3m de profundidade, revestida por tubulação de concreto e com base não revestida, que possibilita a infiltração de efluentes diretamente no solo. A área de estudos possui topografia bastante plana, com declive próximo de 1° no sentido SW da área.

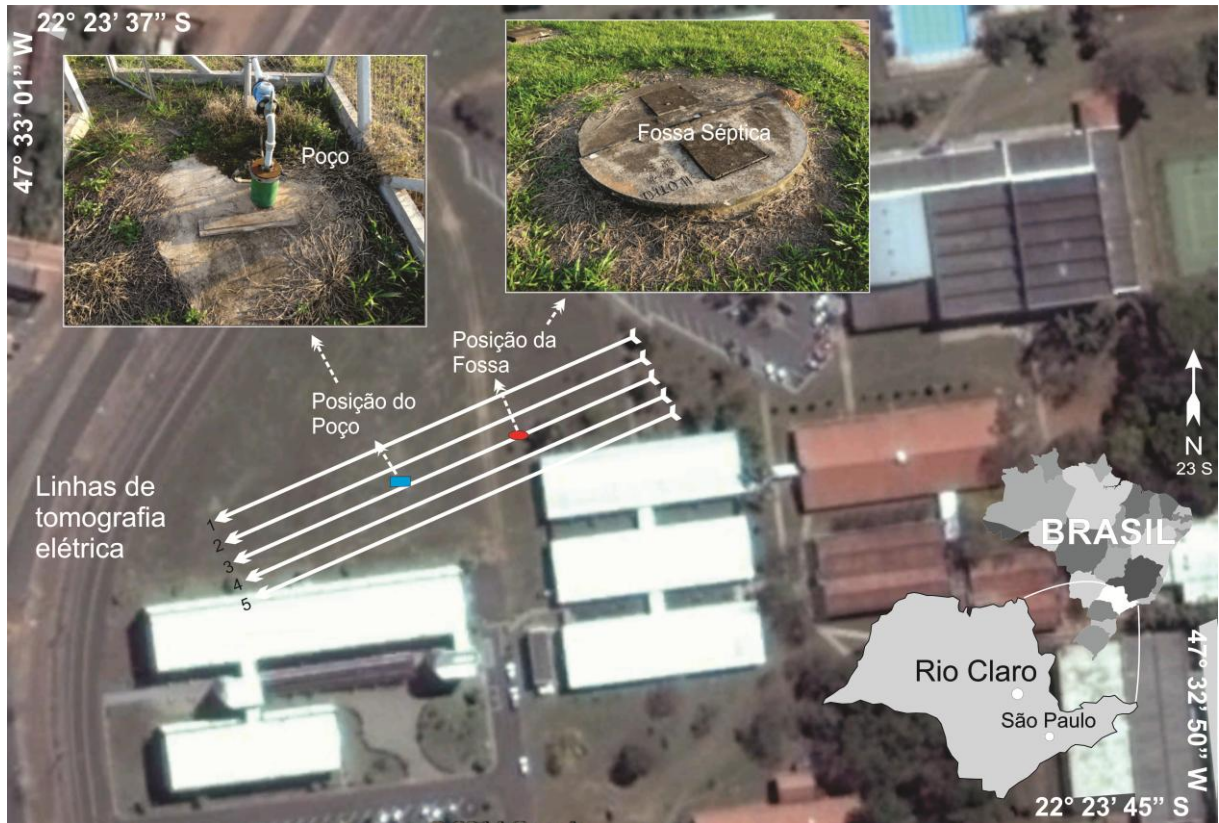


Figura 1. Localização da área de estudos, com destaque para os alvos investigados.

Em termos fisiográficos, o município de Rio Claro está inserido na Depressão Periférica Paulista, unidade geomorfológica caracterizada por terrenos rebaixados e altitudes entre 500m a 700m. O município possui ainda uma média pluviométrica de 1.400mm /ano e um regime de chuva dividido em período de seca, entre abril e setembro, e um período chuvoso que dura de outubro a março que corresponde a 80% das precipitações anuais (TROPMAIR, 1992).

4. GEOLOGIA REGIONAL

A região de estudo está inserida no contexto da Bacia do Paraná que corresponde a uma bacia intracratônica simétrica do tipo sinéclise, contida inteiramente na placa sul-americana e que possui um registro sedimentar-magmático de até 7000 metros de espessura.

A estratigrafia da Bacia do Paraná no Estado de São Paulo é caracterizada pela superposição de seis sequências deposicionais limitadas por discordâncias e baseadas na carta estratigráfica proposta (MILANI; FRANÇA; SCHNEIDER, 1994). São encontradas as seguintes unidades:

Embasamento - Constituído por granitos, migmatitos, gnaisses, xistos e quartzitos. Aflora em maior parte na porção nordeste da bacia.

Grupo Itararé - Compreende a sequência sedimentar de idade permo-carbonífera, com depósitos caracterizados principalmente por diamictitos que refletem influências glaciais. É dividido em quatro formações: Campo do Tenente, Aquidauana, Mafra e Rio do Sul. Esta formação é caracterizada pela presença de sedimentos vermelhos, essencialmente arenosos (SCHNEIDER *et al.*, 1974).

Formação Tatuí - De idade Eopermiana, apresenta-se bem desenvolvida na parte de afloramentos na faixa centro-oeste do estado de São Paulo e é constituída por um membro inferior onde predominam lamitos de coloração marrom-aroxeada, e um superior composto por lamitos cinza-esverdeados, arenitos e calcários (SOARES, 1974).

Formação Irati - Apresenta ocorrência generalizada na bacia com espessuras da ordem de 40 metros. É dividida em dois membros: Taquaral e Assistência. O primeiro corresponde a uma sequência de folhelhos e siltitos na base da formação, enquanto o segundo corresponde a folhelhos cinza escuro, folhelhos pretos pirobotuminosos e calcários (BARBOSA; DE ANDRADE GOMES, 1958)

Formação Corumbataí – Composta por argilitos, folhelhos e siltitos com coloração cinza escura na sua porção inferior e por argilitos, folhelhos e siltitos arroxeados a avermelhados com intercalações de bancos carbonáticos e camadas de arenitos muito finos na porção superior.

Formação Pirambóia – É composta por arenitos esbranquiçados, amarelados, avermelhados, de médios a muito finos, geralmente sílto-argilosos, com grãos polidos,

subangulares e subarredondados associados a intercalações de finas camadas de argilitos e siltitos. Apresenta estratificações cruzadas planares e acanaladas, e estratificações plano-paralelas nas porções siltico-argilosa (SCHNEIDER *et al.*, 1974).

Formação Botucatu - É constituída de arenitos avermelhados, finos a médios, normalmente bimodais, friáveis, com grãos foscos e geralmente bem arredondados. Na parte basal ocorrem em geral arenitos argilosos e mal selecionados. Estratificações plano-paralelas e cruzadas acanaladas são comuns, bem como estratificações cruzadas tangencias em grandes cunhas nas porções mais basais (SCHNEIDER *et al.*, 1974).

Formação Serra Geral - Corresponde a um derrame de lavas basálticas com intercalações de lentes e camadas arenosas que recobrem as formações gondwânicas da Bacia do Paraná. Apresenta ocorrência generalizada na bacia (SCHNEIDER *et al.*, 1974).

Formação Itaqueri – De idade Paleocênica-Eocênica, está assentada sobre superfície regular, desenvolvida nos basaltos da Formação Serra Geral ou diretamente sobre a Formação Botucatu. É comumente composta por depósitos rudáceos (conglomerados com clastos derivados predominantemente de rochas básicas), arenitos (MONTANHEIRO; YAMAMOTO; KIHARA, 2002).

Formação Rio Claro - A Formação Rio Claro consiste em depósitos de arenitos acorseanos mal selecionados, arenitos conglomeráticos e argilitos (BJORNBERG; LANDIM, 1966).

4.1. Geologia local

A unidade geológica que aflora na área de estudos é a Formação Rio Claro, que nesta região apresenta uma espessura aproximada de 20 metros, sobreposta aos siltitos da Formação Corumbataí (OLIVA; KIANG; CAETANO-CHANG, 2005).

A Formação Rio Claro é composta por depósitos Neoceno-zóicos que recobrem extensas áreas no Estado de São Paulo e ocorrem em níveis escalonados do relevo, vinculados a fases de aplainamento. O trabalho de (MELO; COIMBRA; CUCHIERATO, 1997) propõe a divisão desta unidade em quatro grandes litofácies a partir de critérios granulométricos e texturais: lamitos originados por processos gravitacionais, cascalhos e areias oriundas de canais e barras fluviais, arenitos finos decorrentes do rompimento de diques marginais e argilitos sedimentados em planícies de inundação. Este conjunto recobre um horizonte basal

composto por conglomerados derivados de processos de erosão do substrato durante as fases iniciais de deposição desta unidade (OLIVA & CHANG, 2007).

Na área de estudos, a Formação Rio Claro é representada por um solo oriundo da alteração de arenitos, com predominância da fração areia fina a média. Baseado em perfil descritivo do poço de captação no local de estudos, os primeiros dez metros de profundidade são constituídos de um arenito pouco consolidado com matriz siltosa.

5. HIDROGEOLOGIA

As águas subterrâneas circulam através vazios, também denominados como poros que ocorrem entre os grãos dos solos e das rochas sedimentares. Em outras situações, a água circula através de fraturas conectadas em rochas maciças e compactas como granitos, gneisses e basaltos. A fluidez dessas águas, de modo geral, está condicionada a parâmetros de permeabilidade, sendo que esta última indica a facilidade com que a água flui através dos poros, relacionando-se diretamente com o tamanho, volume e conexão dos poros conectados (IRITANI; EZAKI, 2012).

O homem tem explorado os aquíferos livres há séculos como fonte água utilizada em atividades agrícolas ou como fonte de abastecimento das cidades. Esse tipo de aquífero pode ser facilmente explorado e a sua capacidade de recarga pode ser insuficiente para mantê-los. Os aquíferos rasos também podem ser contaminados por fertilizantes, agrotóxicos e muitos outros poluentes advindos das atividades antrópicas.

As formações geológicas subterrâneas que possuem a capacidade de armazenamento e transmissão de água podem ser definidas como aquíferos. Tais depósitos são abastecidos pela precipitação atmosférica, a qual é capaz de trazer a água dos mares até as áreas de recarga nos continentes (COELHO; HAVEN, 2015).

5.1. Aquíferos Livres

Os aquíferos também podem ser classificados de acordo com suas características hidráulicas, isto é, dependendo da pressão que estão submetidos. O aquífero livre (ou freático), em geral, está mais próximo à superfície, região em que a zona saturada está em contato direto com a zona não saturada, sendo assim submetido à pressão atmosférica (IRITANI; EZAKI, 2012). Nessa situação, a água que infiltra no solo atravessa a zona não saturada e recarrega diretamente o aquífero (Figura 2).

Esse tipo aquífero é relativamente mais vulnerável à poluição porque recebem recarga direta das águas que caem sobre o solo e infiltram em subsuperfície. Isso torna importante o planejamento, bem como também, monitoramento de instalações em empreendimentos que manipulem substâncias nocivas que de alguma forma cheguem até as águas subterrâneas desses aquíferos (IRITANI; EZAKI, 2012).

Segundo dados da CETESB (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental), órgão responsável pelo controle ambiental no Estado de São Paulo, em 1997, cerca de 72%

dos municípios utilizavam água subterrânea para o abastecimento público. Em 2006, esta porcentagem subiu para 80%.

O rebaixamento acentuado do nível das águas desses aquíferos pode afetar o fornecimento de água para os mananciais superficiais, rios e nascentes (IRITANI; EZAKI, 2012)

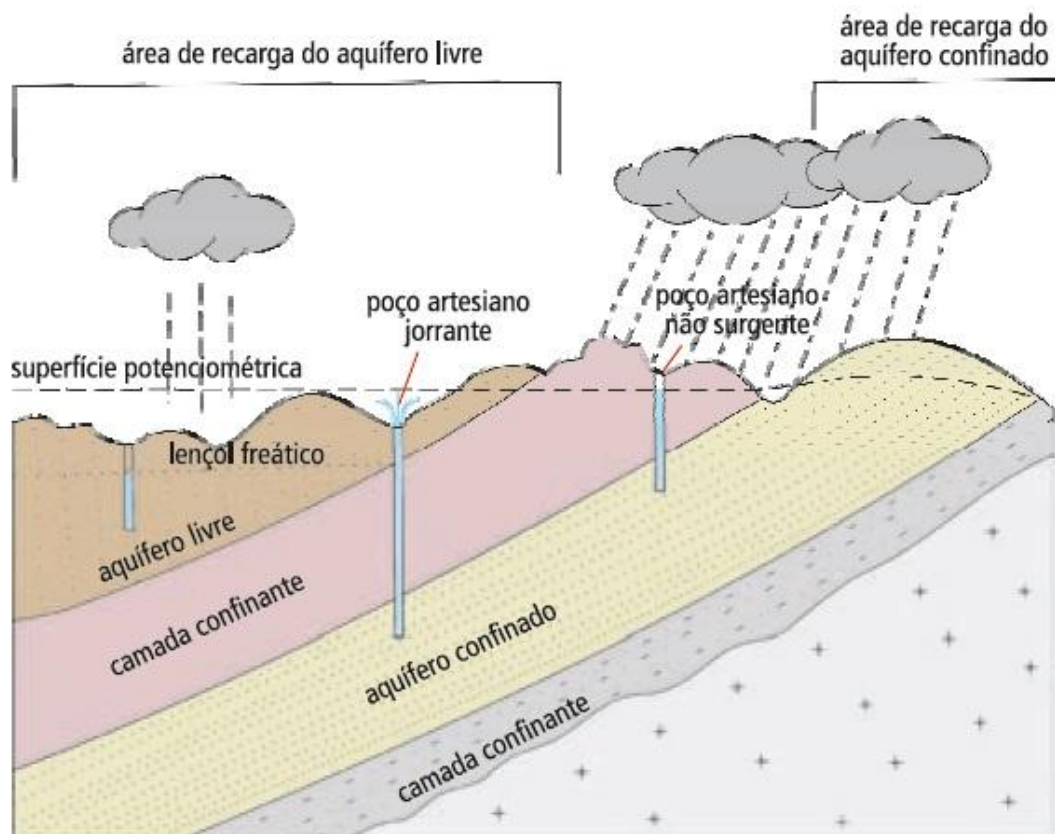


Figura 2. Aquífero livre e confinado (IRITANI; EZAKI, 2012).

5.1.1. Aquífero Rio Claro

A Formação Rio Claro é caracterizada como um aquífero livre na região de Rio Claro, com elevada transmissividade e poços com vazões entre $17\text{m}^3/\text{h}$ e $25\text{m}^3/\text{h}$. Um segundo sistema aquífero de caráter confinado, é representado por litotipos do Grupo Tubarão, com profundidades superiores a 200m e vazão entre $20\text{m}^3/\text{h}$ e $37\text{m}^3/\text{h}$ (DAEE, 1981).

Devido ao incremento na demanda do abastecimento doméstico, industrial e agropecuário na região de Rio Claro, muitas indústrias têm explorado água em poços

artesianos. Contudo, a elevada e desordenada exploração do Aquífero Rio Claro pode gerar problemas futuros no suprimento de água (OLIVA, A. & CHANG, 2007).

6. CONTAMINANTES

Os esgotos domésticos são compostos por matérias orgânicas e inorgânicas dissolvidas, em formato coloidal ou em suspensão. A água está presente em 99,9% dos esgotos e atua como agente transportador (PAGANINI, 1997).

Os compostos sólidos orgânicos são constituídos predominantemente por proteínas, carboidratos, gorduras e uréia. Enquanto os sólidos inorgânicos são constituídos de substâncias minerais dissolvidos e areia (COELHO, 2007).

Os principais microrganismos presentes nos esgotos domésticos são bactérias, vírus, protozoários e helmintos.

6.1. Pluma de Contaminação

A pluma de contaminação implica na área atingida pelo contaminante, assim como na forma como ele se desloca em subsuperfície. Existindo assim tipos distintos de plumas de contaminação em relação ao sua forma e tamanho (Figura 3). Que dependem de fatores como perfil geológico, fluxo de água subterrânea local e regional, o tipo e concentração do contaminante, variações nas taxas de fluxo, tipos litológicos e o tempo de desenvolvimento da pluma (CLEARLY; MILLER, 1984).

Segundo Dyminski, (2006) os fatores que interferem no transporte de substâncias em solos são:

- Características do contaminante (solubilidade, densidade, concentração, pH, D.B.O, D.Q.O, etc)
- Características do solo (granulometria, mineralogia da fração argila, permeabilidade, matéria orgânica, etc).
- Características do ambiente (tempo de exposição do solo ao contaminante, presença de microrganismos, temperatura e condições aeróbicas/anaeróbicas).

TIPOS DE PLUMAS DE CONTAMINAÇÃO

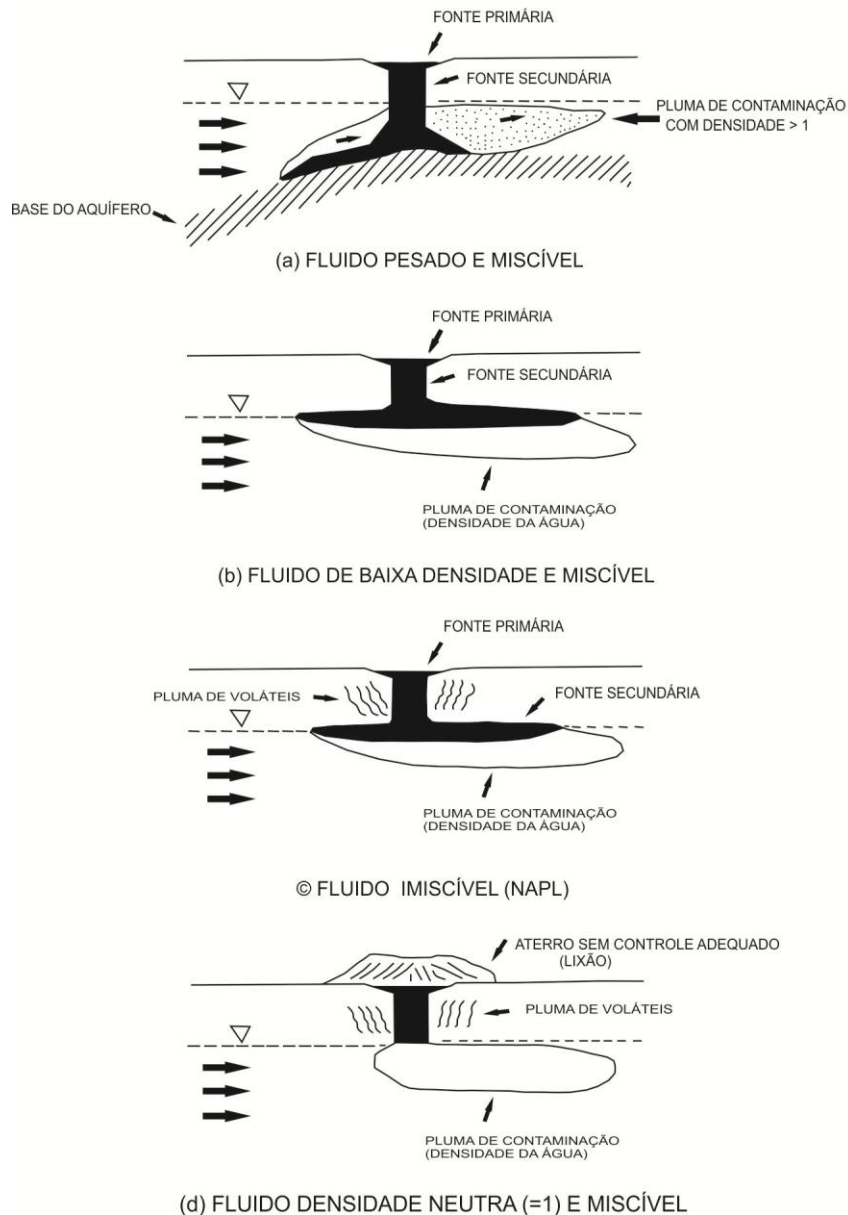


Figura 3. Formas e tamanhos distintos de plumas (DYMINSKI, 2006).

6.1.2. Gerenciamento de Áreas Contaminadas

O intuito de gerenciar áreas contaminadas é proteger a população que vive ao redor de áreas degradadas e os recursos ambientais envolvidos. Definindo a área de investigação, para quantificar a contaminação, avaliar as características da fonte contaminante (concentração e tipo de contaminante), dos meios afetados, da pluma de contaminação (limite, forma e taxa de propagação).

O gerenciamento de áreas contaminadas implica na realização de investigações geoambientais, as quais são baseadas em diagnósticos multidisciplinares que envolvem parâmetros geológico-geotécnicos, hidrogeológicos, assim como também as características físico-químicas dos poluentes (MORAES; TEIXEIRA; MAXIMIANO, 2014).

A otimização dos recursos técnicos e financeiros implica na adoção de estratégias que são constituídas por etapas sequenciais baseadas nos processos de identificação e recuperação, utilizando as formas de intervenções mais adequadas (CETESB, 1999).

O processo de identificação de áreas contaminadas está relacionado à localização das áreas contaminadas e atende a quatro etapas:

- Definição da região de maior interesse
- Identificação de áreas potencialmente contaminadas
- Avaliação preliminar
- Investigação confirmatória

O processo de recuperação de áreas contaminadas implica na adoção de medidas corretivas que possibilitem uso compatível após a intervenção. Sendo esse processo composto por seis etapas a seguir:

- Investigação detalhada
- Avaliação de risco
- Investigação para remediação
- Remediação
- Monitoramento

7. GEOFÍSICA

A geofísica é um ramo da ciência focado no estudo de materiais geológicos, bem como estruturas e camadas, através da análise de parâmetros físicos intrínsecos como densidade, radioatividade, magnetização, entre outros. Baseado em instrumentos que permitem realizar medidas indiretas e ainda possibilitam investigações da ordem de centímetros a centenas de metros de profundidade (MILSOM; ERIKSEN, 2011).

A rapidez na avaliação de grandes áreas a um custo relativamente mais baixo são as principais vantagens da aplicação de técnicas geofísicas em estudos ambientais diretos da subsuperfície como as sondagens e poços de monitoramentos. Além disso, os levantamentos geofísicos proporcionam a execução de perfis contínuos que possibilitam a identificação mais precisa de variações laterais relacionadas a mudanças litológicas ou alterações oriundas da contaminação subterrânea (CETESB, 1999).

As principais desvantagens associadas às técnicas geofísicas são a necessidade de equipamentos específicos para a medição de propriedades físicas e as suas susceptibilidades a interferências antrópicas como são o caso dos transformadores elétricos e das linhas de alta tensão (SOUZA; GANDOLFO, 2012).

7.1. Método da Eletrorresistividade

O método da eletrorresistividade é desenvolvido a partir de uma operação em que se injetada uma corrente contínua (ou alternada de baixa frequência) entre dois pontos, A e B, do terreno e a diferença de potencial é medida entre outros dois pontos, M e N (Figura 4).

A resistividade é uma medida de resistência de um material ao fluxo de corrente elétrica. Quanto mais baixa for a resistividade, mais facilmente o material permite a passagem de uma carga elétrica.

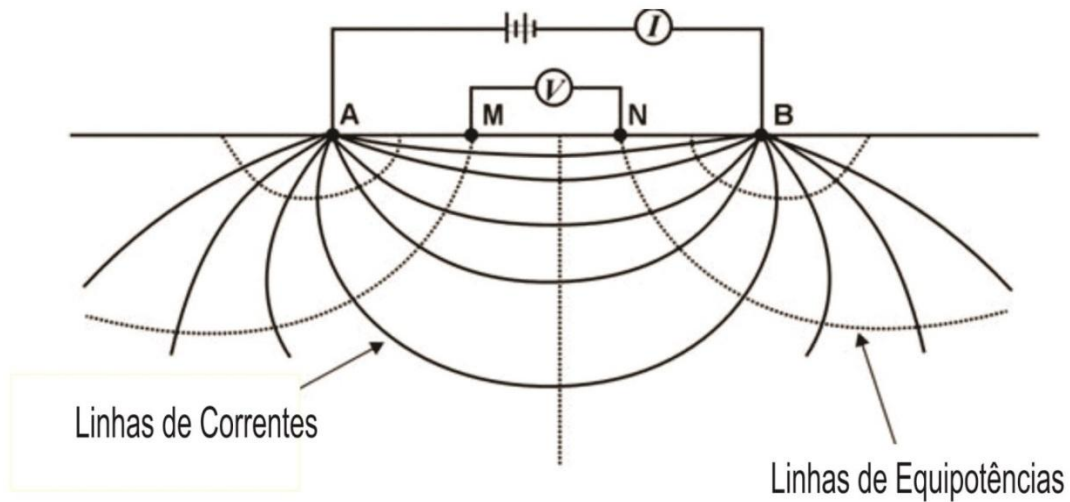


Figura 4. Circuito elétrico de resistividade de um meio homogêneo em subsuperfície (MILSOM; ERIKSEN, 2011).

Para tal situação, de acordo com lei de Ohm, calcula-se a resistividade para um meio homogêneo e isotrópico a partir da seguinte equação:

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

Em que:

ΔV – Diferença de potencial elétrico entre M e N. [V]

I – Corrente contínua aplicada entre A e B. [A]

ρ – Resistividade elétrica. [Ω .m]

O fator geométrico do arranjo geral quadripolo AMNB é representado pela letra **K** e, é válido para qualquer arranjo. Segundo Keller & Frischknecht (1966), o fator geométrico é dado pela seguinte equação:

$$K = 2\pi \cdot (1/AM - 1/BM - 1/AN + 1/BN)^{-1}$$

O ambiente geológico não é um espaço homogêneo conforme a descrição da fórmula anterior, de modo que uma única medida seria suficiente para se conhecer o comportamento resistivo do meio. Porém essa simplicidade não é encontrada nos ambientes geológicos, existindo assim variações verticais e laterais da resistividade, o que leva a escrever a equação anterior, na forma:

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

Denominada a resistividade aparente, então ρ_a dependerá não apenas das resistências verdadeiras da subsuperfície, mas também do arranjo dos eletrodos de medidas. Para saber o comportamento dessa resistividade aparente, é necessário que a distância as distâncias dos eletrodos de corrente (A e B), sejam aumentadas, continuamente para obter informações até a profundidade de interesse da investigação.

É comum dois tipo de configuração para eletrodos:

- Os eletrodos de corrente são deslocados simetricamente em relação a um ponto central.
- Os eletrodos de corrente, assim como os de potencial se deslocam simultaneamente, mantido constante o espaçamento entre os eletrodos.

7.1.1. Classificação das Modalidades Geométricas.

Uma classificação dos métodos geométricos proposta por Braga (1997), fundamenta-se em três critérios: método geofísico, técnica e arranjo de campo. O primeiro implica no parâmetro físico medido (resistividade, cargabilidade, potencial espontâneo, etc). O segundo critério se relaciona ao tipo de investigação horizontal e/ou vertical (sondagens, caminhamentos e perfilagens). O terceiro e último parâmetro implica na escolha do arranjo, isto é, a adoção do tipo de disposição dos eletrodos no desenvolvimento da técnica (Schlumberger, Wenner, Dipolo-dipolo, etc).

7.1.2. Arranjos de Eletrodos

A metodologia da eletrorresistividade permite a utilização de inúmeras possibilidades de arranjos de eletrodos. No entanto, a escolha do arranjo irá depender de uma série de fatores, como o tipo de alvo de estudo, a sensibilidade de cada arranjo para as variações horizontais e verticais, a razão sinal/ruído, a profundidade de investigação pretendida etc (GANDOLFO, 2007).

7.1.3. Arranjo Dipolo-Dipolo.

Esse tipo de arranjo é rápido e versátil, quando executado em campo. Apresenta como grande vantagem, a realização do estudo da variação lateral do parâmetro físico em vários níveis de profundidades, caracterizando assim materiais de subsuperfície, tanto horizontalmente como verticalmente. Esta característica se torna importante em estudos ambientais, em que uma pluma de contaminação, por exemplo, pode ser estudada lateralmente e também em profundidade (BRAGA, 1997).

O arranjo dipolo-dipolo apresenta as seguintes características:

- Os dipolos AB e MN não são fixos ao longo da linha levantada.
- O espaçamento entre AB é igual ao MN.
- O espaçamento entre AB e MN varia.
- Utiliza vários dipolos MN simultaneamente e cada um é referido a um nível de investigação.

A figura 5 ilustra a disposição desse arranjo, em que cada par de dipolos MN representa um nível de profundidade investigada. É importante ressaltar que o potencial diminui, na medida em que se afasta do dipolo AB, então a precisão das leituras mais afastadas também será menor.

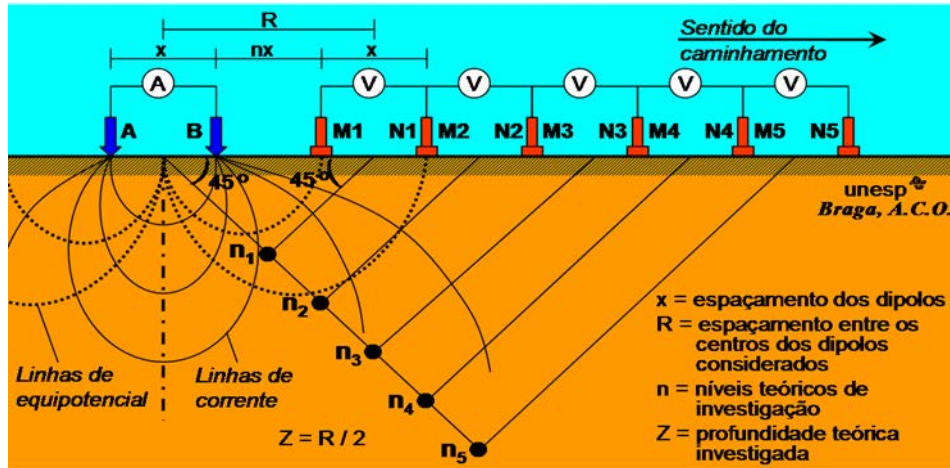


Figura 5. Esquema de aquisição utilizando o arranjo D-D (BRAGA, 1997).

7.1.4. Arranjo Wenner

O arranjo Wenner é constituído por quatro eletrodos combinados em linha e igualmente espaçados. E a distância entre os eletrodos é definida pela letra “a”. Em relação ao aumento da profundidade de investigação, será aumentada com o incremento da abertura entre os eletrodos. A relação $AM = MN = NB$ é constante durante o ensaio (figura 6).

Segundo (BRAGA, 1997), esse arranjo é menos prático no campo, porque é necessário o deslocamento de quatro eletrodos. As leituras também estão mais sujeitas as interferências produzidas por ruídos e por último, é mais susceptível a erros interpretativos devido a heterogeneidades laterais. Embora atualmente existam equipamentos que fazem as leituras simultâneas, isto é, sem o deslocamento dos eletrodos.

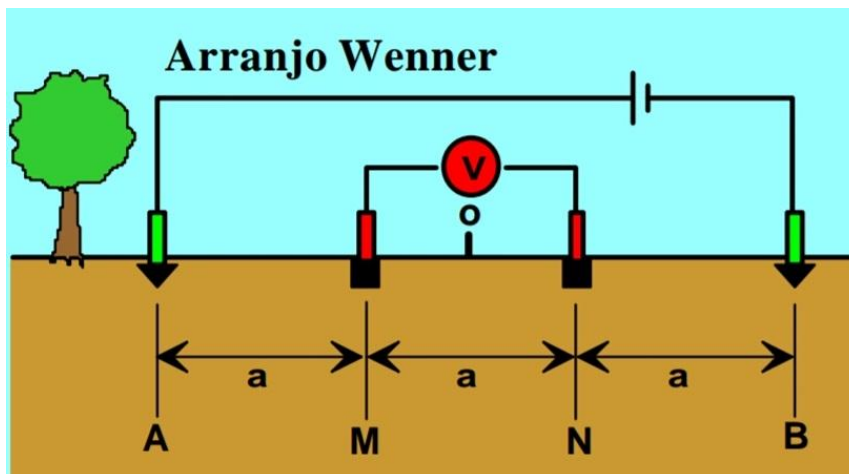


Figura 6. Arranjo Wenner com espaçamento constante entre os eletrodos (BRAGA, 1997).

7.1.5. Arranjo Schlumberger

O arranjo Schlumberger é simétrico em relação a um ponto central, os eletrodos de potencial M e N permanecem fixos, enquanto os eletrodos de corrente A e B apresentam uma separação crescente definida pela letra “L” (figura 7). É um arranjo com grande potencialidade para resolução de camadas horizontais (apresenta boa resolução vertical) (GANDOLFO, 2007).

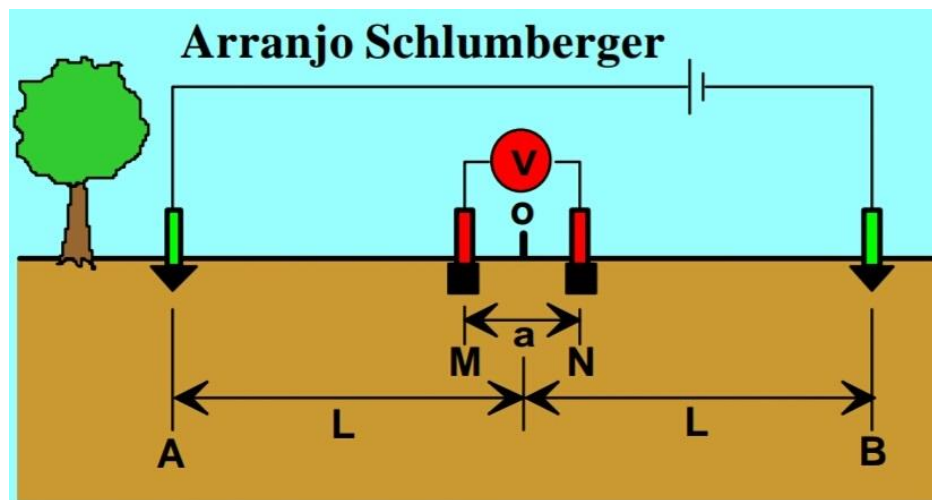


Figura 7. Disposição dos eletrodos do arranjo Schlumberger (BRAGA, 1997).

8. MATERIAIS E MÉTODOS

A aquisição de dados em campo consistiu na realização de leituras de resistividade elétrica pela aplicação da técnica de tomografia elétrica (ERT), em cinco linhas de investigação com comprimento individual de 105m e espaçamento entre eletrodos de 5m, dispostas paralelamente e separadas a cada 5m (Figura 8).

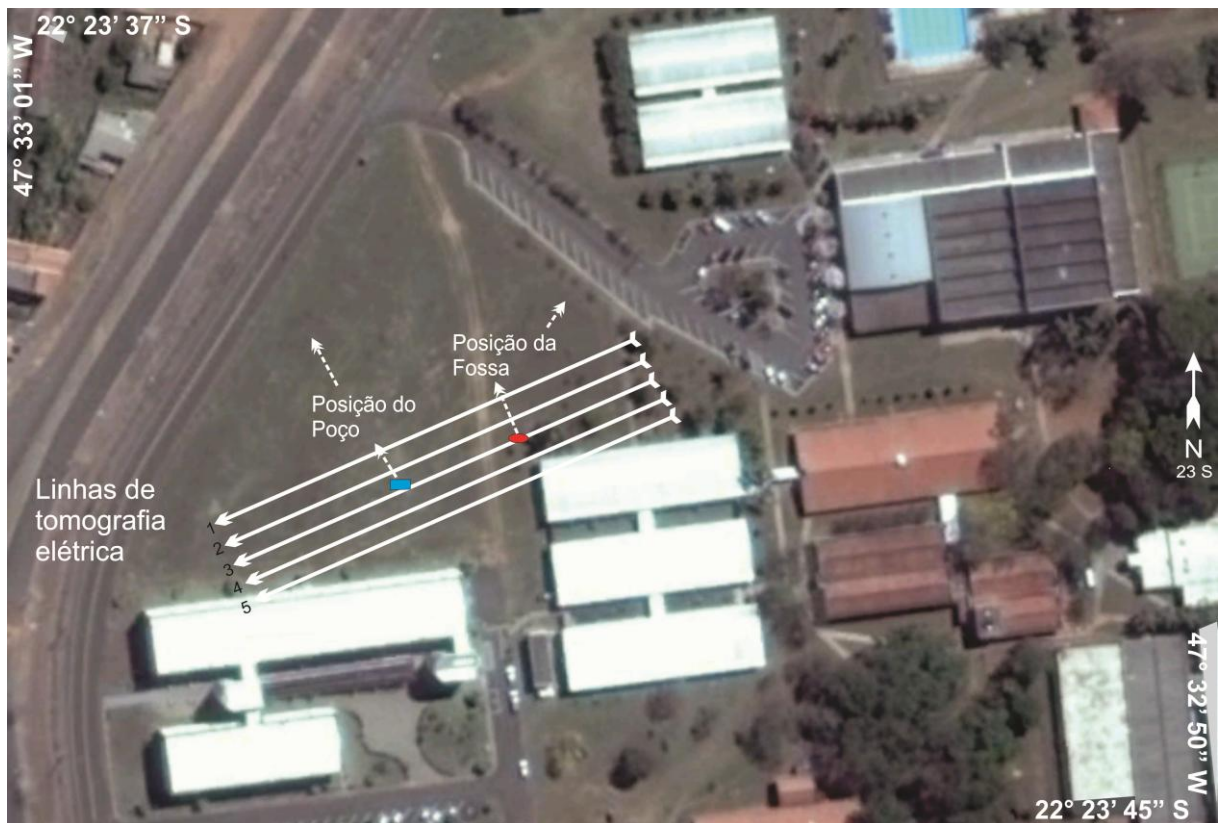


Figura 8. Linhas de tomografia elétrica.

A fossa séptica e o poço de captação de água, alvos de estudos nesta pesquisa, estiveram posicionados no centro deste esquema de aquisição de dados, com o objetivo de detecção de eventuais alterações laterais ou em profundidade, relativas à infiltração de efluentes ou pelo rebaixamento artificial do aquífero, respectivamente.

Neste trabalho foram realizadas aquisições a partir dos arranjos Dipolo-dipolo, Wenner e Schlumberger, para avaliação comparativa da sensibilidade individual e possibilidade de modelagem de pluma de contaminação gerada por infiltração de efluentes inorgânicos da fossa séptica e do cone de depressão do poço de captação.

O equipamento geofísico utilizado foi o resistímetro Terrameter LS, fabricado pela ABEM Instrument (Suécia), que consiste em módulo único de transmissão e recepção de sinais automatizados a partir de programação prévia, com potência de 250 W, resolução de 1 μ V e corrente máxima de 2,5 A (figura 9) . Permite a realização de ensaios de potencial espontâneo (SP), eletrorresistividade (ER) e polarização induzida (IP) por meio de ciclos periódicos de transmissão e recepção de sinais, cálculo automático da resistência de contato e do desvio padrão do conjunto de medidas (ABEM, 2012).



Figura 9. Resistímetro Terrameter LS.

As medidas adquiridas em campo foram processadas no programa Res2dinv e resultaram em seções de resistividade em termos de distância versus profundidade, com escala gráfica logarítmica e intervalos de interpolação de valores em cores. Este é um programa que determina automaticamente um modelo bidimensional de subsuperfície, a partir de dados de resistividade ou cargabilidade obtidos em ensaios de aquisição 2D (GRIFFITHS; BARKER, 1993).

O modelo 2D utilizado no programa divide a pseudo-seção em blocos retangulares, que representarão a pseudo-seção pelo ajuste das medidas de campo.

Esta otimização procura reduzir a diferença entre os valores de resistividade aparente, calculados e medidos em campo, pelo ajuste da resistividade do modelo de blocos, cuja diferença é expressa pelo erro RMS (Root Mean Squared) (LOKE; BARKER, 1996).

O produto numérico de inversão bidimensional dos dados de cada seção foi reunido em planilha única, a qual contém a posição das leituras ao longo das linhas (variável “x”), espaçamento entre linhas (variável “y”), profundidade modelada pela inversão (variável “z”) e o valor de resistividade elétrica (variável “R”).

Esta planilha foi utilizada para geração de modelos de visualização 3D na plataforma Geosoft, numa rotina de etapa básicas adotadas em pesquisa mineral. Neste caso, o plano de amostragem é frequentemente definido a partir de critérios estatísticos, estruturais, disposição espacial de uma acumulação mineral, dentre outros (MOON *et al.*, 2006). Um procedimento simples consiste em amostragens por um conjunto de furos perpendicular ao eixo principal da estrutura, sucedidos por um conjunto paralelo de linhas de furo.

A resolução da malha de amostragem é condicionada ao espaçamento entre furos, entre linhas de furos e entre quantidade de amostras coletadas por furo. De qualquer forma, o resultado analítico das amostras é tabelado e modelado em termos bidimensionais e posteriormente interpolado em termos tridimensionais. Cada ponto do modelo 3D final é transformado num bloco, com dimensões condicionadas a critérios estatísticos e de malha amostral, ao qual é atribuído um teor baseado em análises químicas e um valor médio de densidade relativa à rocha que hospeda o minério. A relação entre teor em volume possibilita o cálculo de reservas e a viabilidade econômica do empreendimento (MOON *et al.*, 2006).

Modelos geofísicos de visualização 3D derivados de seções 2D proporcionam uma compreensão bastante ampla da complexidade de estruturas geológicas e hidrogeológicas, como o fluxo de poluentes a o modelamento de litotipos ou depósitos minerais (AIZEBEOKHAI *et al.*, 2011; CHAMBERS *et al.*, 2006; MOREIRA *et al.*, 2012).

9. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme descrito nos materiais e métodos (capítulo 8), os dados obtidos no modelo de inversão foram reunidos em tabela única e serviram de base para a elaboração dos modelos de inversão. (Figura 10).

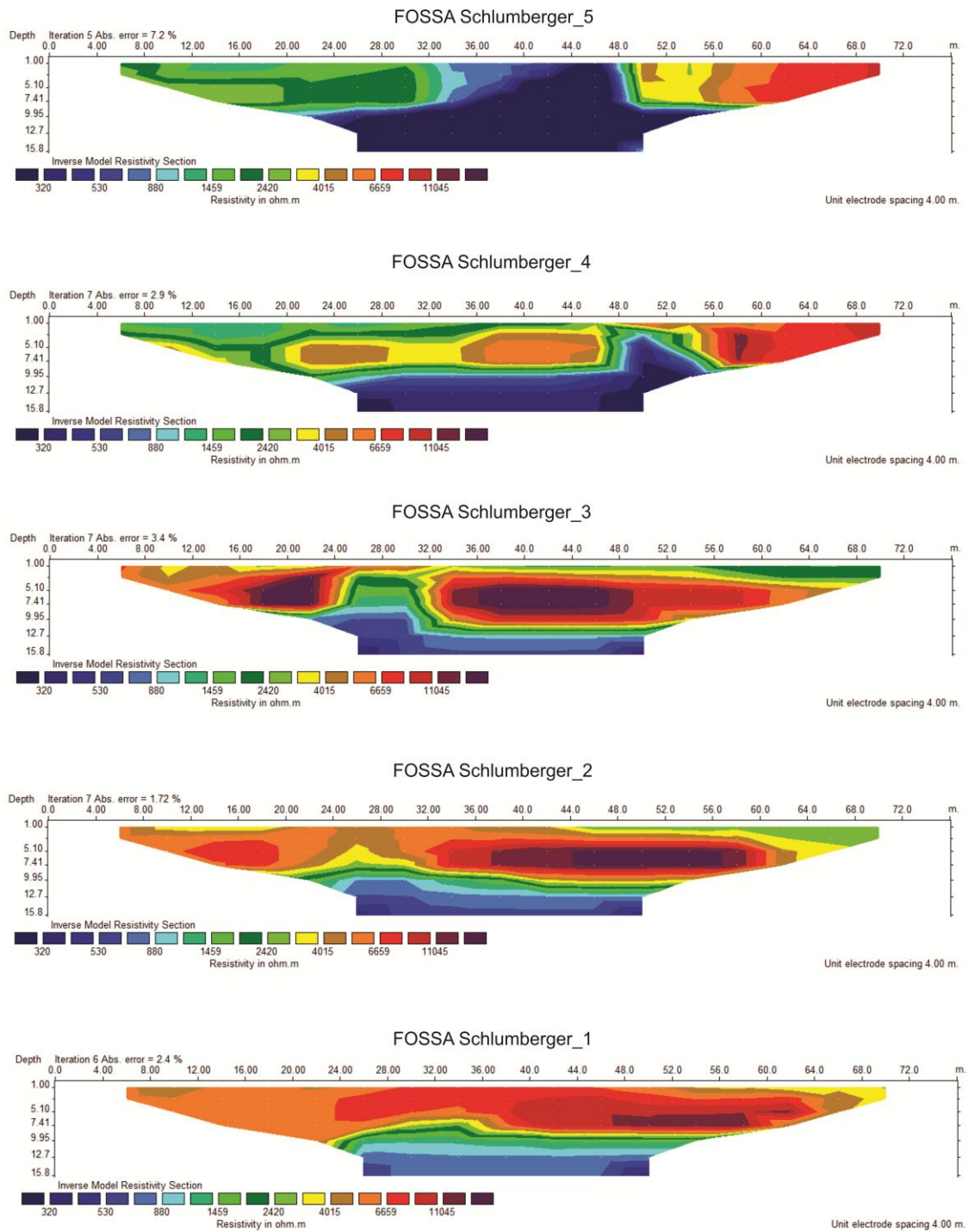


Figura 10. Modelo de inversão para o arranjo Schlumberger.

Baseado no princípio de amostragem direta em pesquisa mineral, a malha amostral de dados geofísicos foi planejada com o objetivo de interpolação lateral das linhas a partir dos modelos de inversão 2D, por meio do método da mínima curvatura, com auxílio do programa Oasis Montaj, plataforma Geosoft, para geração de horizontes ou superfícies de suavização 3D para diversas profundidades (Figura 11).

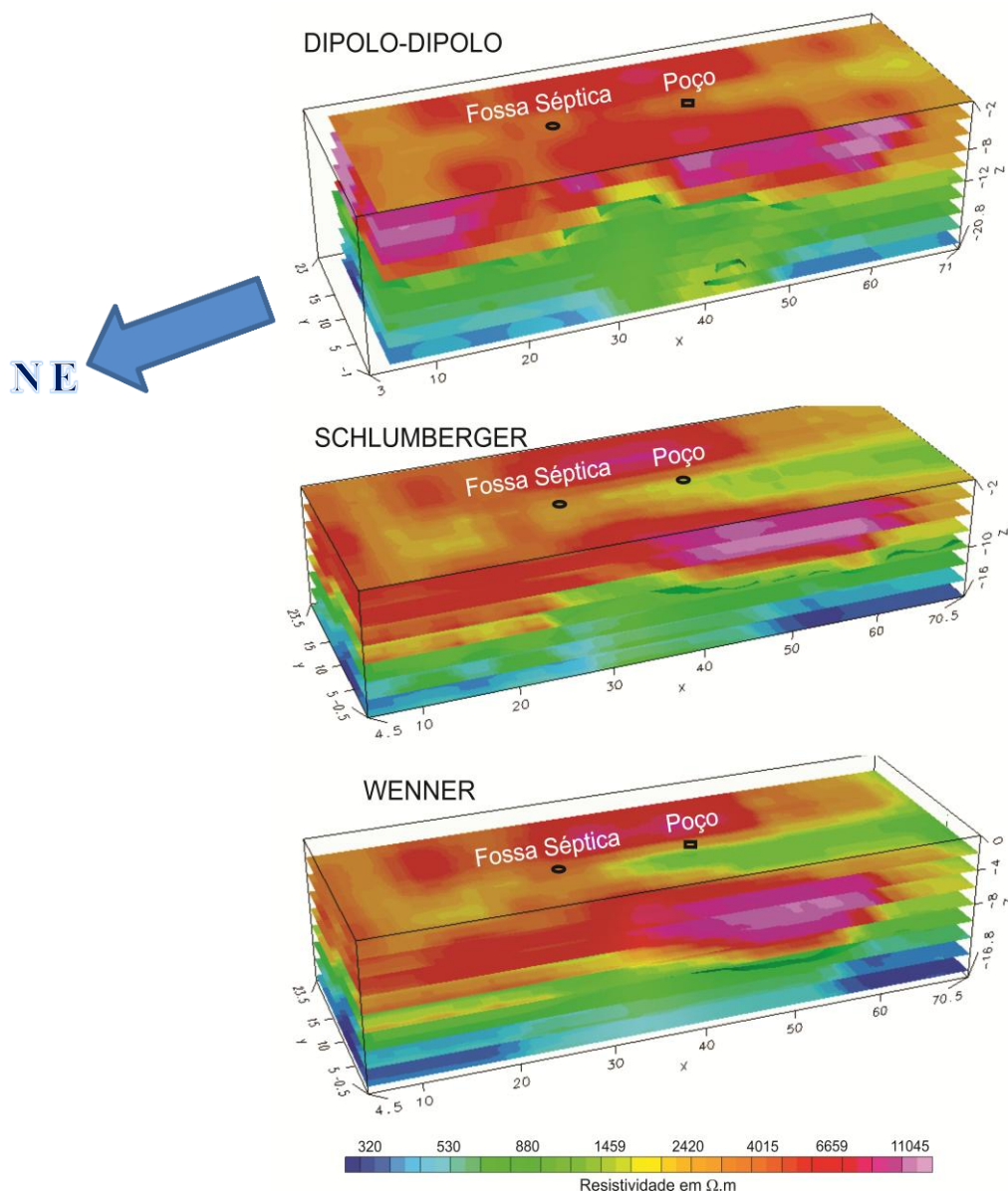


Figura 11. Blocos em 3D das superfícies de resistividade interpoladas.

A partir dos blocos com superfícies de resistividade interpoladas, foram modeladas superfícies de isovalores de resistividade para cada bloco representativo de um arranjo de

aquisição, que revelasse as estruturas em estudo neste trabalho (pluma de contaminação e cone de depressão). O valor de $620 \Omega.m$ foi adotado como o mais adequado em termos individuais e para fins comparativos, que corresponde aproximadamente a franja capilar do aquífero livre em estudos (Figura 11).

A análise dos modelos de resistividade deve considerar o comportamento das estruturas analisadas em termos do contraste de resistividade em relação ao solo.

O efluente proveniente da fossa séptica é quimicamente caracterizado de forma simplificada como composto inorgânico, enriquecido em sais minerais (amônia, nitratos) e matéria orgânica dissolvida (fezes) (SARA, 2003). A interface basal da fossa séptica permite contato direto com o solo, onde ocorre a filtragem da massa orgânica e infiltração de água e sais minerais. Seu fluxo em material arenoso e com umidade incipiente resultam num contraste e em baixos valores de resistividade (Figura 12).

O bombeamento de água no poço de captação ocasiona uma queda localizada do nível freático num raio de influência do poço, denominado cone de depressão (FITTS, 2002). O material arenoso contido na porção interna desta estrutura é relativamente mais seco quando comparado aos materiais lateralmente presentes na porção exterior, que resulta num contraste em altos valores de resistividade (Figura 12).

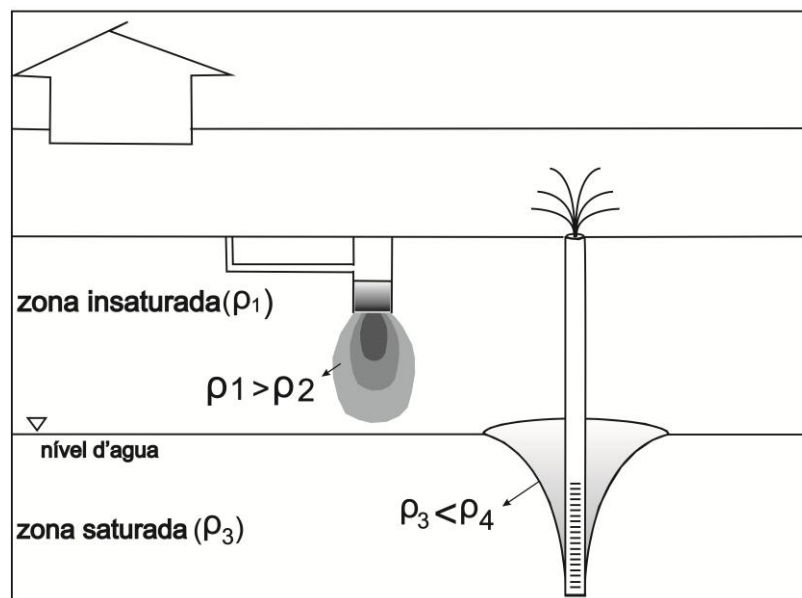


Figura 12. Modelo de dispersão gravitacional da pluma e do cone (Baseado em FITTS, 2002; SARA, 2003)

A análise dos dados referentes ao arranjo Dipolo-Dipolo revela claramente uma estrutura cilíndrica de extremidade superior aberta, indicativo de aumento da resistividade das

bordas para o centro, posicionada abaixo do poço de captação (Figura 13). Esta estrutura deve ser produzida pela depleção do nível aquífero ao redor da zona de influência de sucção do sistema de bombeamento. Associado a fossa séptica existem também alterações de resistividade, embora não possibilitam a modelagem de superfície com alguma relação com o fluxo de líquidos de baixa resistividade em ambiente arenoso ou algo semelhante a uma pluma de contaminação.

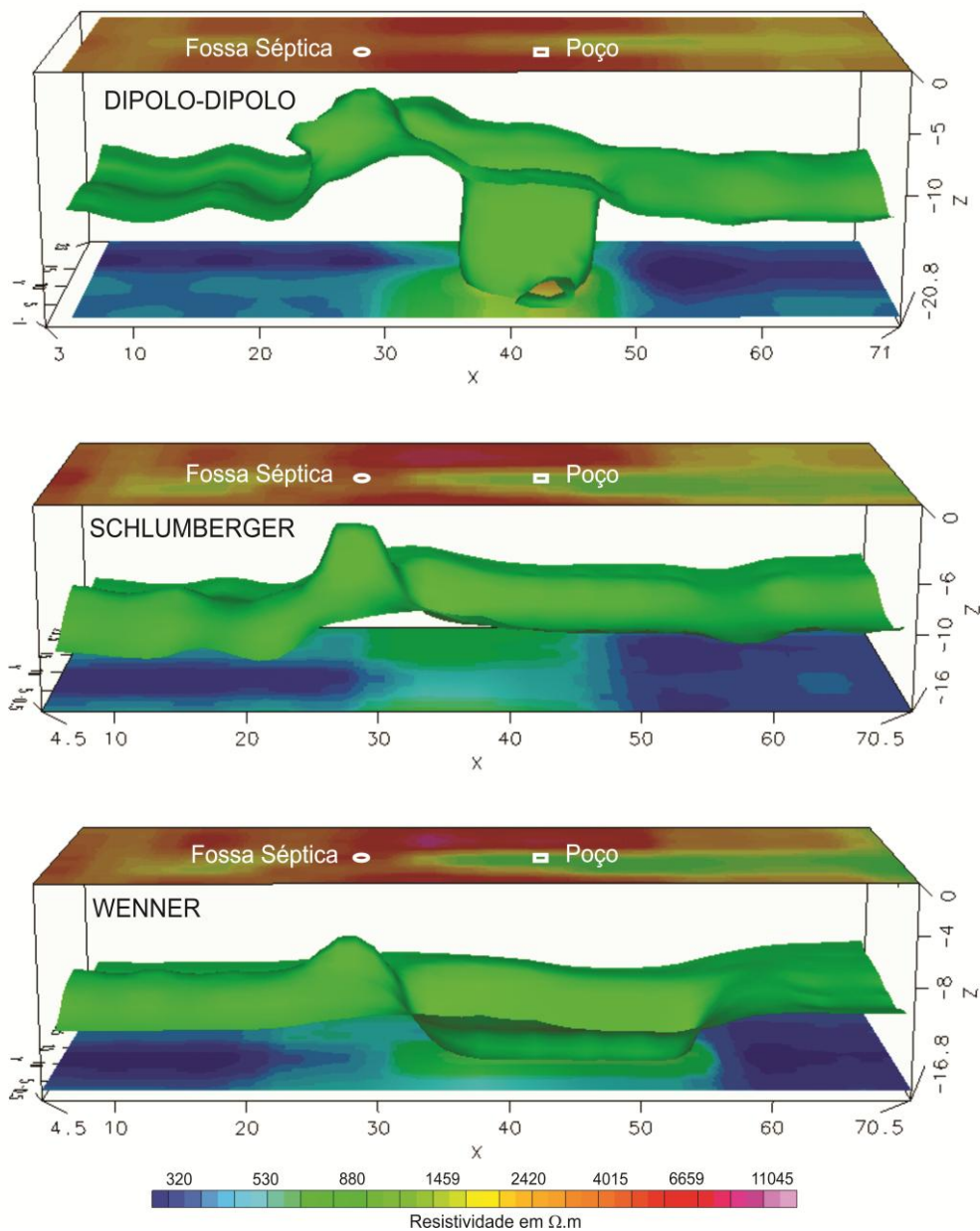


Figura 13. Superfícies 3D de isovalores de 620 $\Omega.m$ para os arranjos de aquisição.

Os dados relativos ao arranjo Schlumberger não apresentam qualquer estrutura que faça referência ao cone de depressão do poço de captação (Figura 13). A estrutura cônica

modelada abaixo da posição da fossa séptica provavelmente reflete a infiltração de efluentes de baixa resistividade. A extremidade superior do cone é fechada, indicativo de aumento da resistividade acima desta profundidade, e coincide com uma fonte pontual (base da fossa), ao passo que sua extremidade inferior possui diâmetro relativamente maior, um reflexo da percolação vertical e lateral de efluentes até o contato com o nível aquífero, sob a forma de uma gota em termos tridimensionais.

A isosuperfície para o arranjo Wenner resultou no modelamento de uma estrutura longa no sentido de aquisição de dados da linha central e estreita, logo abaixo do poço de captação de água, com tendência de fechamento em profundidade, indicativo de aumento da resistividade em sua porção central (Figura 13). Também ocorre uma estrutura cônica abaixo da fossa séptica, para a qual também é válida as mesmas interpretações atribuídas ao arranjo Schlumberger diante das semelhanças, embora neste caso a estrutura seja verticalmente menos pronunciada.

Características intrínsecas em termos de propagação de campo e de potencial elétrico, produzidas pelo uso de cada arranjo também servem à compreensão dos resultados comparativamente discrepantes em relação aos mesmos alvos investigados.

O arranjo Dipolo-Dipolo é caracterizado pela separação crescente entre eletrodos ou dipolos de corrente e potencial (MUSSETT; KHAN, 2000). Diversos trabalhos demonstram sua aplicabilidade no estudo de contaminações orgânicas e inorgânicas em condições de zona saturada que podem ser comprovadas por análises químicas (ARANGO-GALVÁN *et al.*, 2011; BELMONTE-JIMÉNEZ *et al.*, 2012; DELGADO-RODRÍGUEZ *et al.*, 2014; MOREIRA; DOURADO; BRAGA, 2006).

Em Nyquist *et al.* (2007), os autores demonstram a falta de sensibilidade do arranjo Dipolo-dipolo por meio de seções 2D, na detecção de uma zona de falha verticalizada preenchida por água, posteriormente comprovada por sondagem. Este arranjo foi bastante susceptível a ruídos em estudo de detalhe realizado por (FURMAN; FERRE; WARRICK, 2003), devido a sua alta sensibilidade em níveis rasos, onde foram adotados espaçamentos abaixo de um metro entre eletrodos.

Algo inerente ao arranjo Dipolo-Dipolo é a distorção lateral na propagação de campo e no potencial em situações de pequenas separações entre eletrodos (investigações rasas). Esta tendência é atenuada na medida em que aumenta o espaçamento entre dipolos, embora ocorra de forma concomitante uma redução na sensibilidade ou razão sinal/ruído (investigações profundas). Em ambos os casos, o vetor principal de fluxo tende a ser horizontalizado em

situações de pequenas separações entre eletrodos, com tendência gradativa a verticalização, no caso de grandes separações entre eletrodos (Figura 14).

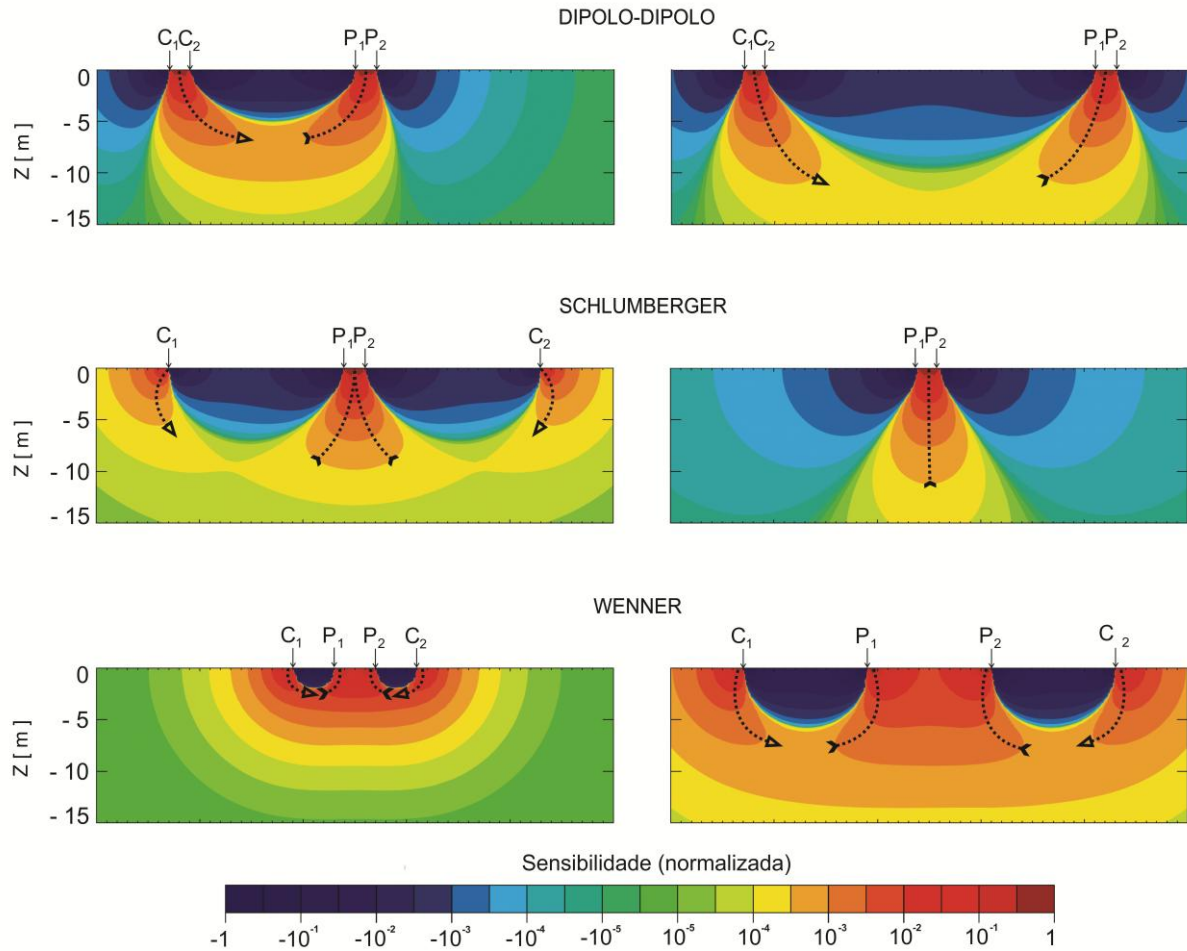


Figura 14. Seções de sensibilidade normalizadas para os arranjos em estudo (Modificado de KNÖDEL; LANGE; VOIGT, 2007).

Quanto ao cone de depressão ao redor do poço de captação, seus limites laterais com o aquífero são inclinados em alto ângulo, numa geometria de cone de base invertida com interface côncava, ou seja, curva no sentido de seu eixo central. A forma de propagação de campo distorcida do arranjo Dipolo-dipolo é efetiva na detecção deste tipo de estrutura, ao menos quanto a sua porção mais rasa. A tendência a horizontalidade do vetor de campo em pequenos espaçamentos possibilita um alto ângulo de incidência na interface do cone de depressão.

Esta situação possibilita a refração de campo, embora resulte numa caracterização parcial da estrutura, visto que se espera uma estrutura de geometria cônica em detrimento a estrutura cilíndrica de modelamento. A concavidade da interface do cone de depressão deve

proporcionar baixos ângulos de incidência em profundidade, aliado a redução no contraste de resistividade (aumento do teor de umidade no centro da estrutura). O início da estrutura cilíndrica a cerca de 7m está demasiadamente distante dos 14m de profundidade do nível aquífero, pois neste caso o cone é iniciado na zona não saturada, algo distante da realidade.

Os arranjos Schlumberger e Wenner são caracterizados por eletrodos de corrente posicionados nos extremos do dispositivo, com eletrodos de potencial fixados na posição central. O arranjo Schlumberger possibilita leituras crescentes e diversas dos eletrodos de corrente para uma mesma abertura de eletrodos de potencial, ao passo que no arranjo Wenner são necessárias aberturas crescentes em todos os eletrodos a cada leitura (MUSSETT; KHAN, 2000). Nos trabalhos de Furman et al. (2003) e Okpoli (2013) são descritos a maior sensibilidade destes arranjos para alvos profundos em relação do arranjo Dipolo-dipolo.

No caso do arranjo Schlumberger, a propagação de campo elétrico e potencial para pequenos espaçamentos resulta numa geometria de campo potencial semelhante a uma gota, com vetor de fluxo principal que tende a verticalização com o aumento da profundidade de investigação e distorção incipiente de campo potencial (Figura 14). Este arranjo é bastante aplicado em estudos hidrogeológicos (DENA *et al.*, 2012; SALEM, 2001; SEQUEIRA GÓMEZ; ESCOLERO FUENTES, 2010; URRUTIA-FUCUGAUCHI *et al.*, 2014).

A tendência das isosuperfícies equipotenciais serem paralelas e horizontalizadas em relação ao vetor principal de campo potencial coincide com as frentes de percolação de líquido proveniente da fossa séptica, condição que deve possibilitar a refração de campo em alto ângulo. As geometrias de campo potencial e da pluma de contaminação na zona não saturada também são muito semelhantes, algo que proporciona um modelamento muito próximo da realidade. A extremidade superior da isosuperfície posicionada a 3m de profundidade coincide com a base da fossa séptica, comprovada em campo, outro fator que corrobora a veracidade do modelo (Figura 13).

Contudo, a geometria complexa do cone de depressão, côncavo e com limite lateral de ângulo de inclinação, resultam numa interface quase paralela ao vetor principal de propagação de campo, condição que aparentemente anula a detecção deste tipo de estrutura por meio do arranjo Schlumberger.

O arranjo Wenner apresenta uma propagação verticalizada dos vetores de campo, ou seja, horizontalização das isosuperfícies de campo elétrico e potencial, levemente atenuada em condições com maiores espaçamentos entre os eletrodos (Figura 14). Baseado nesta característica e em semelhança ao arranjo Schlumberger, é possível reconhecer no modelo na isosuperfície para o arranjo Wenner a existência de uma estrutura cônica abaixo da fossa

séptica. Neste caso, a tendência acentuada de horizontalização das isosuperfícies de campo em comparação ao arranjo Schlumberger, ocasionou um achatamento da estrutura cônica.

Este arranjo apresenta rapidez e versatilidade em aquisições tomográficas (ERT) devido à quantidade relativamente reduzida de leituras (CORWIN; LESCH, 2003; DAHLIN, 2000; SAMOUËLIAN *et al.*, 2003; ZHOU; SHIMADA; SATO, 2001). Em estudo comparativo entre os arranjos Dipolo-dipolo, Schlumberger e Wenner, Zhou *et al.* (2001) afirmam que o arranjo Wenner foi o menos sensível na detecção de feições de abatimento em terreno cárstico (cavidade vazia).

A estrutura posicionada abaixo do poço de captação com formato de quilha e alongado no sentido da linha central, deve ser relacionada ao cone de depressão. A tendência à horizontalização dos vetores de propagação de campo em maiores espaçamentos de eletrodos resulta em alto ângulo de incidência com a interface do cone de depressão, em semelhança ao arranjo Dipolo-dipolo, com refração de campo e definição de contraste lateral.

Contudo, aparentemente tais condições não ocorrem nas linhas laterais ao poço de captação, onde certamente o contraste de resistividade deve ser menor, atribuído a uma posição periférica ao centro do cone de depressão. O procedimento de aquisição de dados por meio de linhas lateralmente paralelas, sucedido por inversão 2D e interpolação em isosuperfície 3D, gerou um artefato de processamento bastante distante do formato cônico real. Embora distorcida, esta isosuperfície é iniciada em 11m, profundidade inicial da franja capilar, horizonte passível de depressão por bombeamento no poço de captação.

10. CONCLUSÕES

Uma comparação de resultados entre arranjos de aquisição de dados geoeletricos revelou a complexidade do estudo de alvos dinâmicos no ambiente geológico. Os elementos analisados estão contidos em solo arenoso seco (pluma de contaminação inorgânica) e em ambiente saturado (cone de depressão), ambos caracterizados por contrastes de baixa e alta resistividade em relação aos materiais ao redor, respectivamente. Este ambiente raso é particularmente relevante em estudos ambientais, geotécnicos e hidrogeológicos, onde os métodos geofísicos elétricos são amplamente aplicados.

Os resultados demonstram que a despeito do contraste de propriedades elétricas existentes entre os alvos estudados e o ambiente ao redor, em alguns casos simplesmente não houve o reconhecimento da estrutura por meio de determinado arranjo, ao passo que alguns modelos geofísicos não foram condizentes com a realidade. Além de todo o cuidado necessário ao planejamento, aquisição e tratamento de dados, a seleção do arranjo é notoriamente relevante ao reconhecimento e modelamento de estruturas passíveis de análises e interpretações coerentes.

A versatilidade do arranjo Dipolo-dipolo em termos de logística de aquisição de dados torna seu uso atrativo em aquisições de campo. Em condições de zona não saturada, contudo, os resultados obtidos neste trabalho demonstram que embora seja possível à definição de contrastes pela presença de pluma de contaminação deste ambiente, o modelamento de isosuperfície resultou num produto totalmente desconexo a estrutura gerada pela propagação de líquidos neste ambiente. Os dados obtidos por meio deste arranjo possibilitaram o modelamento do cone de depressão em termos bastante razoáveis.

Os dados obtidos por meio dos arranjos Schlumberger e Wenner resultaram numa estrutura em forma de gota, abaixo da fossa séptica, muito próximo do formato de uma pluma de contaminação em fluxo vertical. O modelamento em arranjo Schlumberger possibilitou posicionar a extremidade superior da estrutura exatamente abaixo da fossa séptica, aos 3m de profundidade. Entretanto, este mesmo arranjo demonstrou ser ineficaz na detecção e consequentemente no modelamento do cone de depressão, possivelmente devido a questões de propagação de campo elétrico e potencial.

Resultados referentes ao arranjo Wenner permitiram o reconhecimento de uma estrutura no formato de quilha, alongada na direção da linha central, associada ao cone de

depressão. Este formato é atribuído a questões de sensibilidade lateral e procedimento de aquisição/interpolação dos dados, bastante distante do formato de cone invertido.

Diante dos resultados desta pesquisa, o arranjo dipolo-dipolo é recomendado em trabalhos de modelamento de estruturas tridimensionais verticalizadas de alta resistividade. Os arranjos Wenner e Schlumberger são recomendáveis ao modelamento de estruturas tridimensionais verticalizadas de baixa resistividade, com ênfase para o arranjo Schlumberger.

ANEXOS

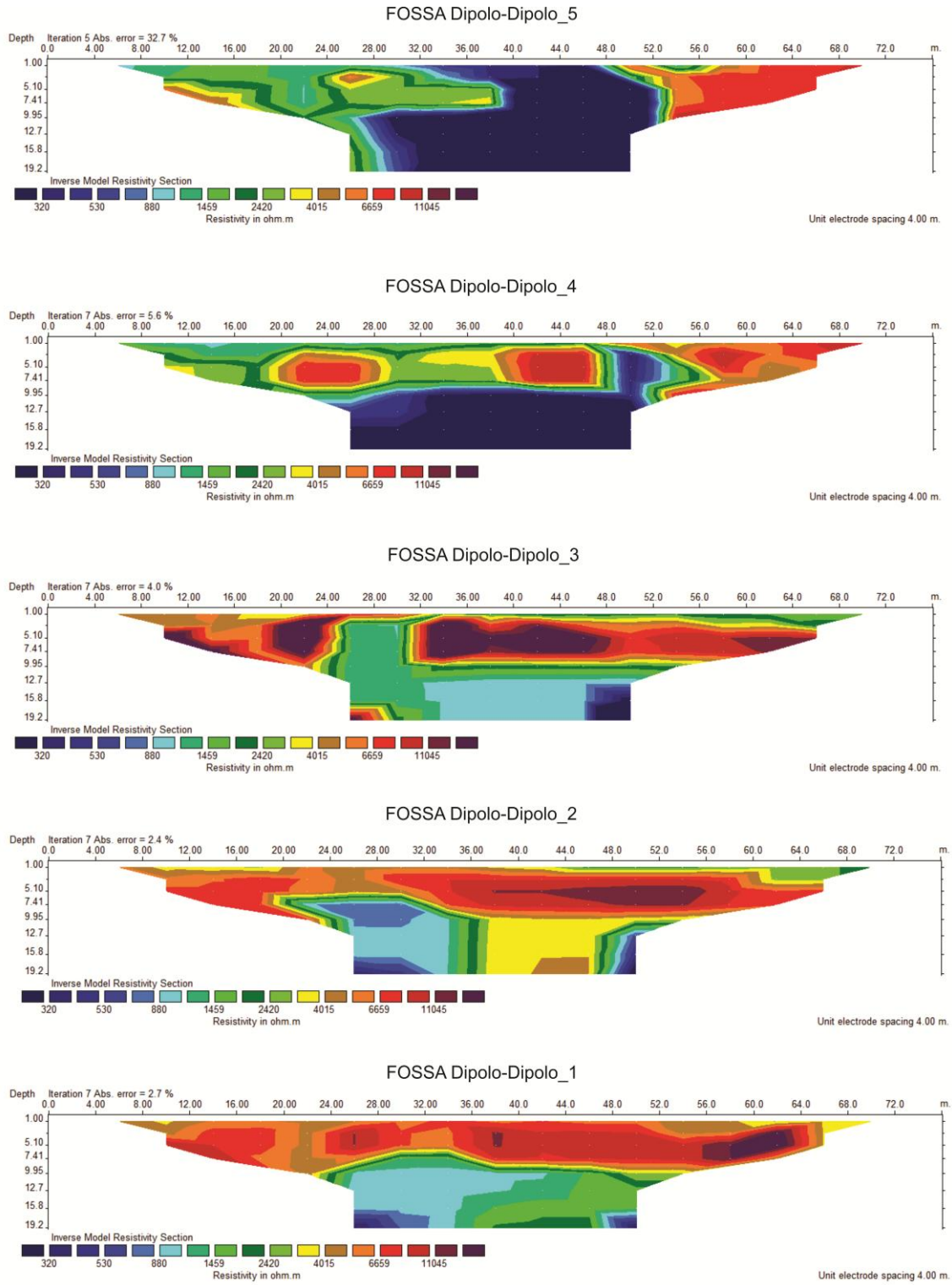


Figura 15. Modelo de inversão para o arranjo Dipolo-Dipolo.

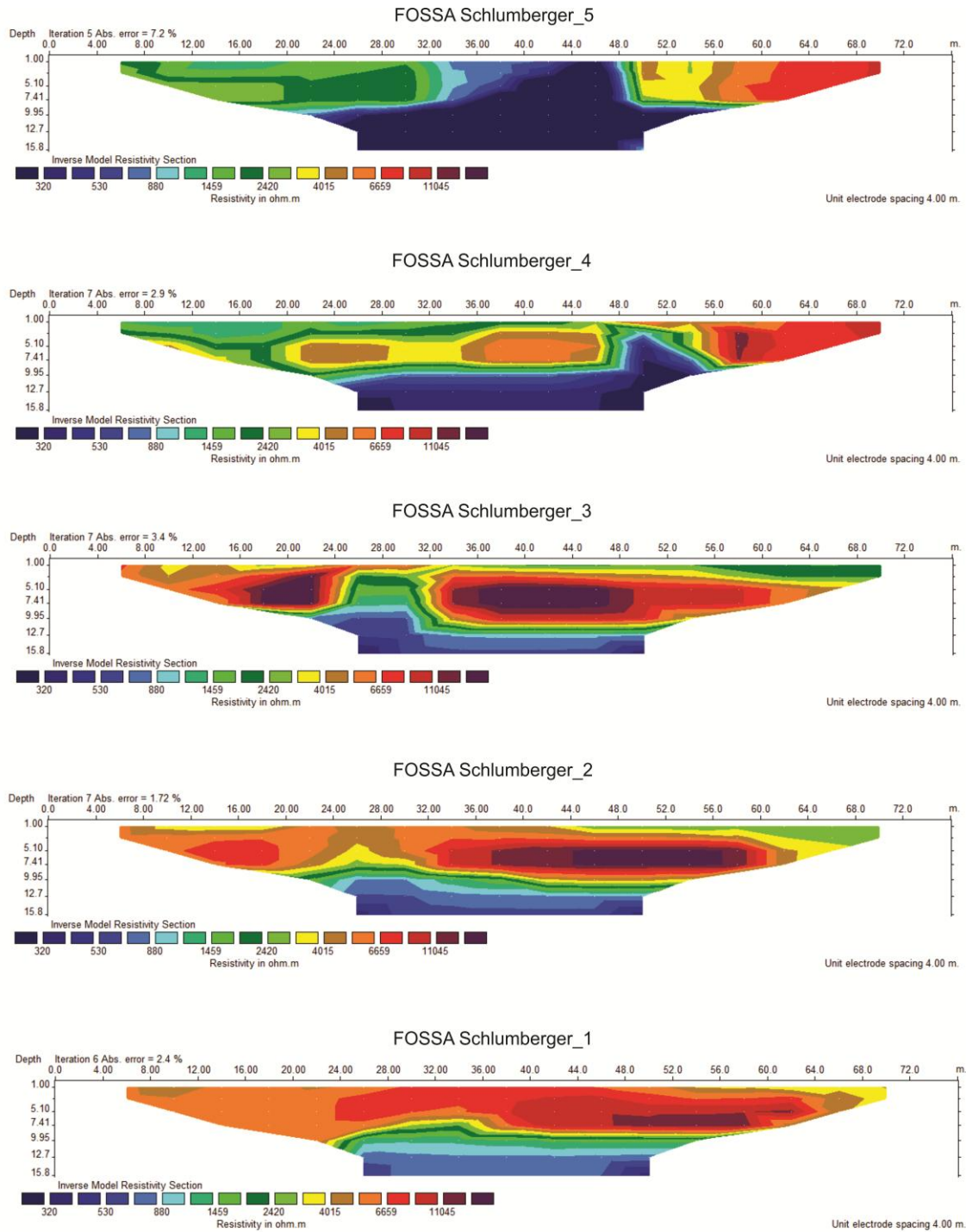


Figura 16. Modelo de inversão para o arranjo Schlumberger.

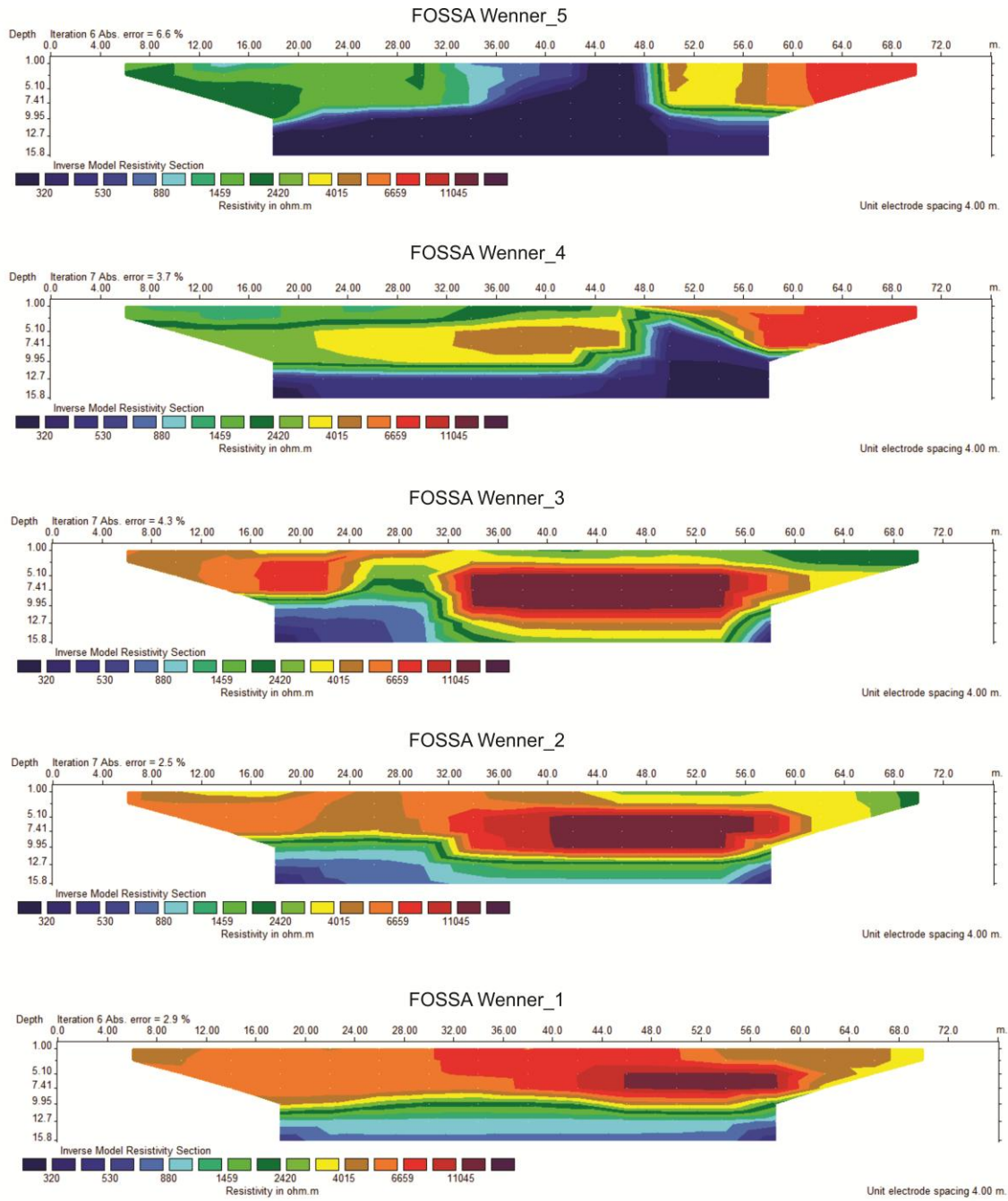


Figura 17. Modelo de inversão para o arranjo Wenner.

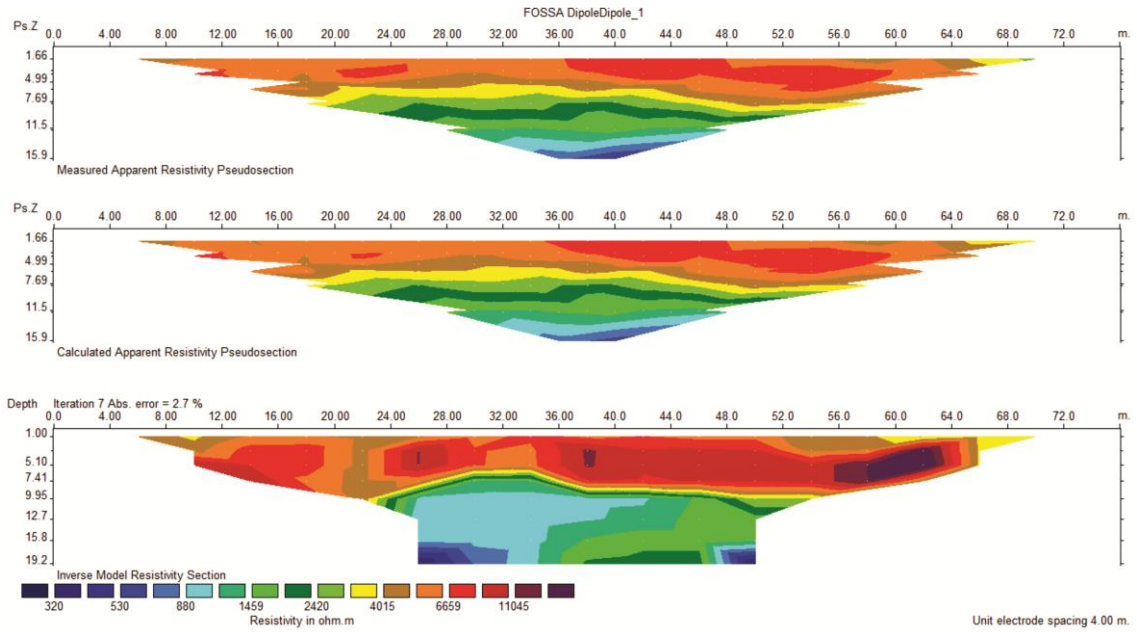


Figura 18. Modelo de inversão para a linha número um do arranjo Dipolo-Dipolo.

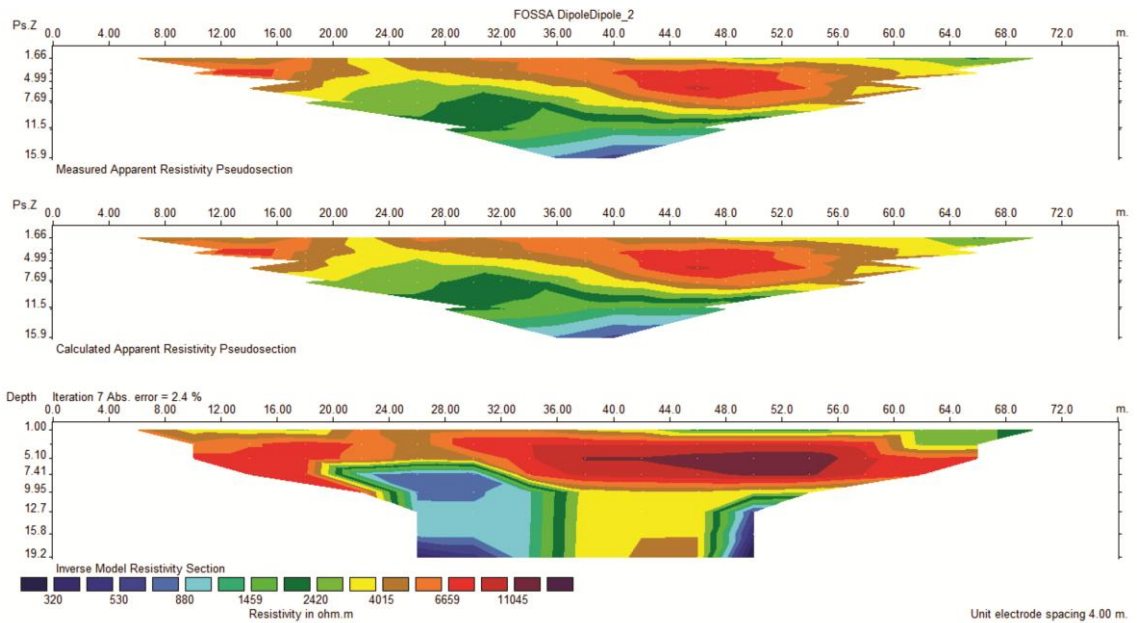


Figura 19. Modelo de inversão para a linha número dois do arranjo Dipolo-Dipolo.

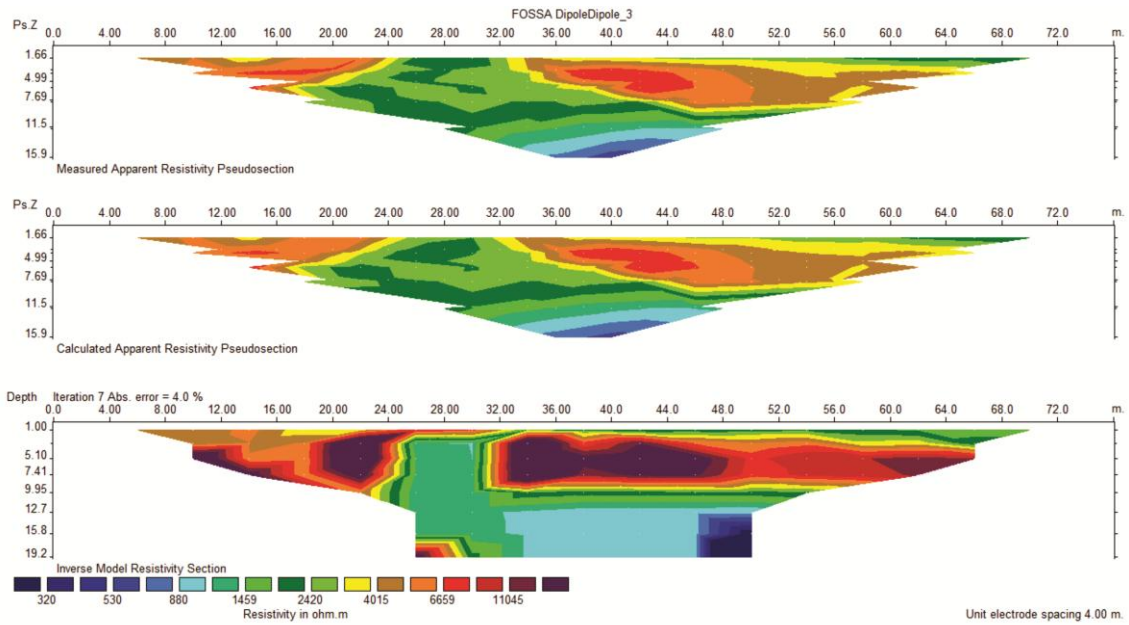


Figura 20. Modelo de inversão para linha número três do arranjo Dipolo-Dipolo.

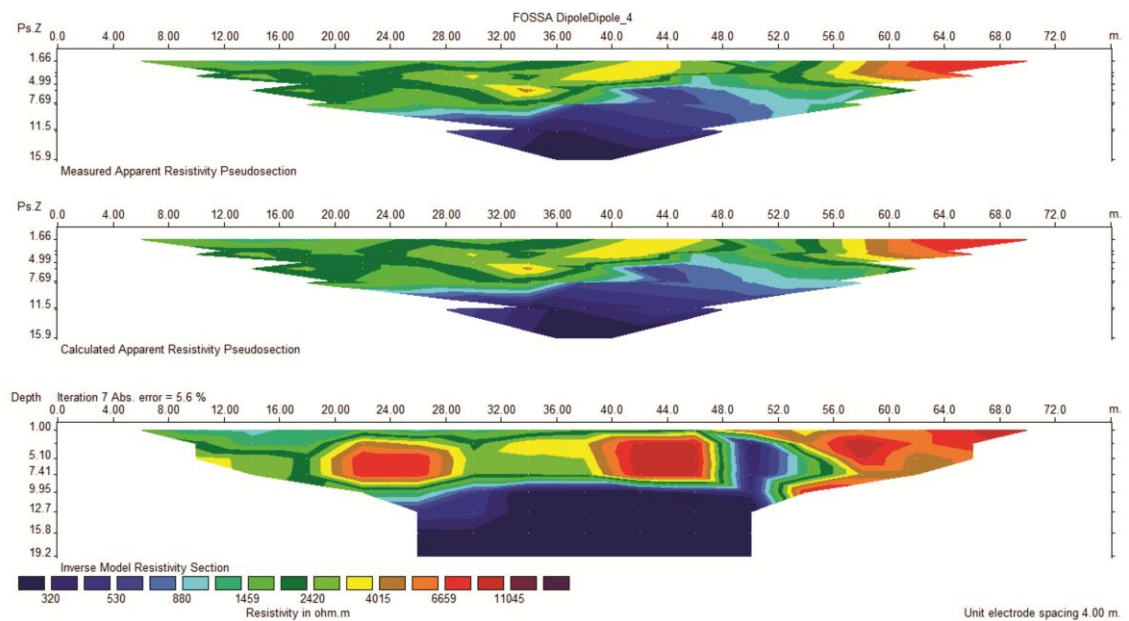


Figura 21. Modelo de inversão para a linha número quatro para o arranjo Dipolo-Dipolo.

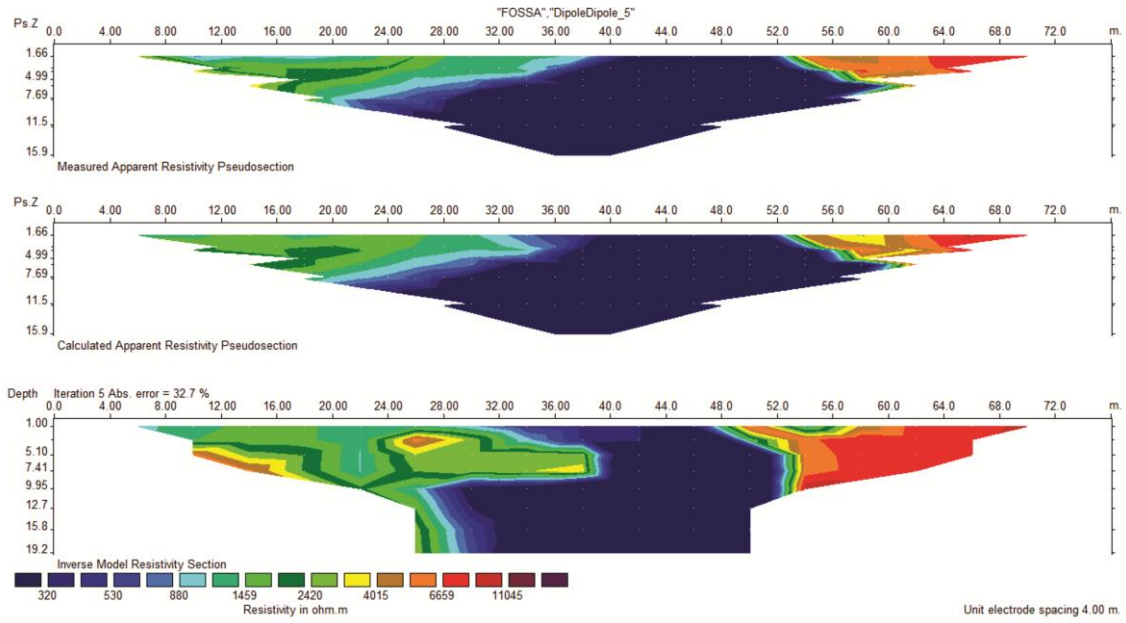


Figura 22. Modelo de inversão para a linha cinco do arranjo Dipolo-Dipolo.

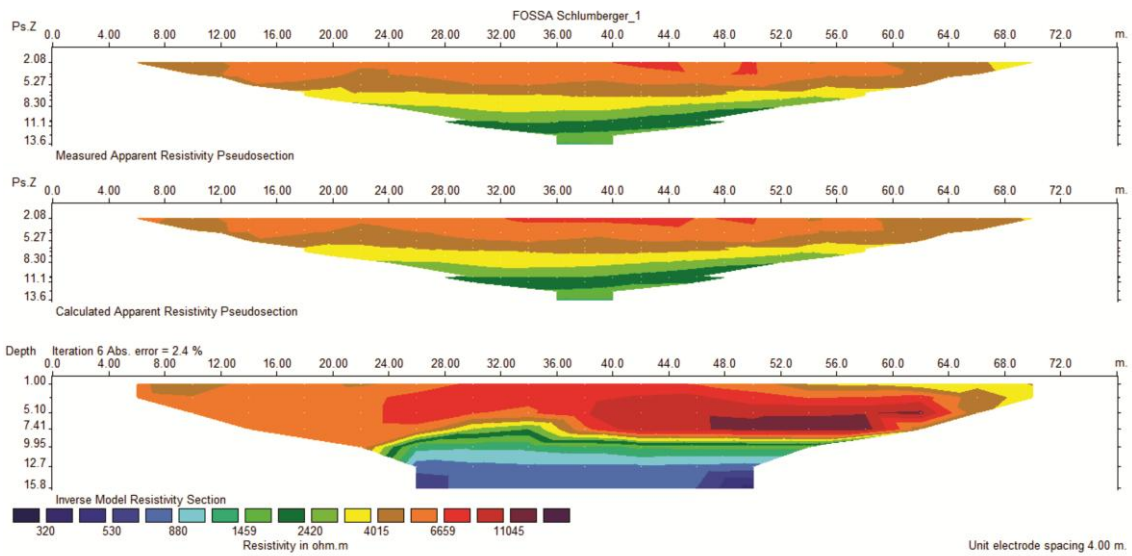


Figura 23. Modelo de inversão para linha um do arranjo Schlumberger

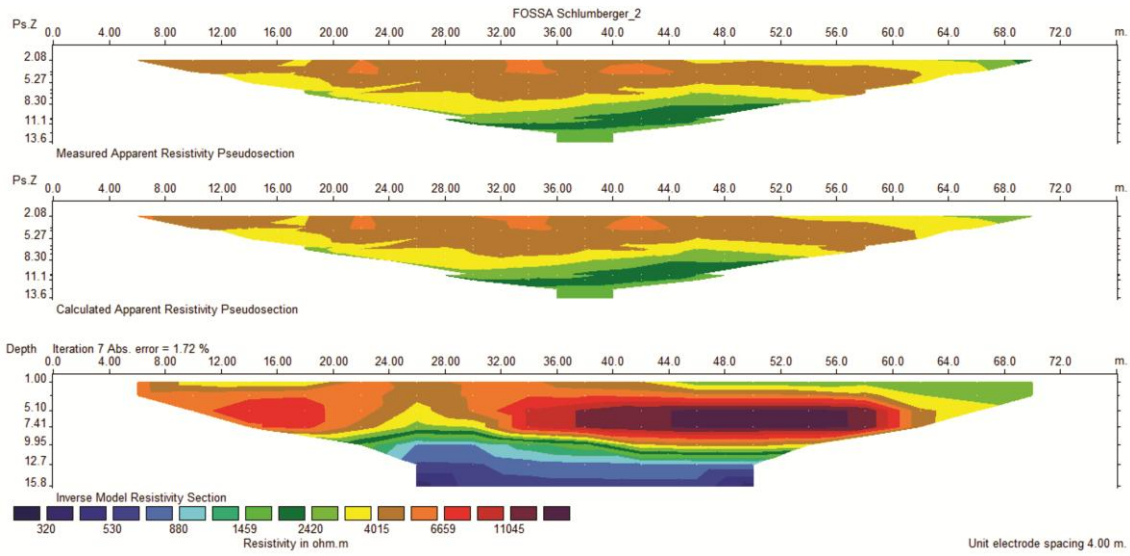


Figura 24. Modelo de inversão para a linha dois do arranjo Schlumberger.

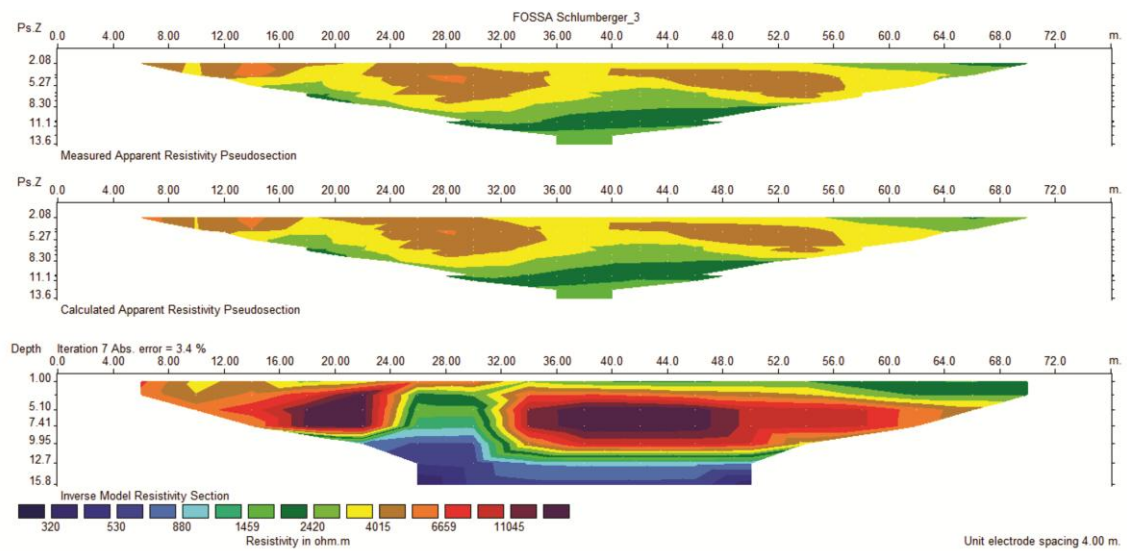


Figura 25. Modelo de inversão para a linha número três do arranjo Schlumberger.

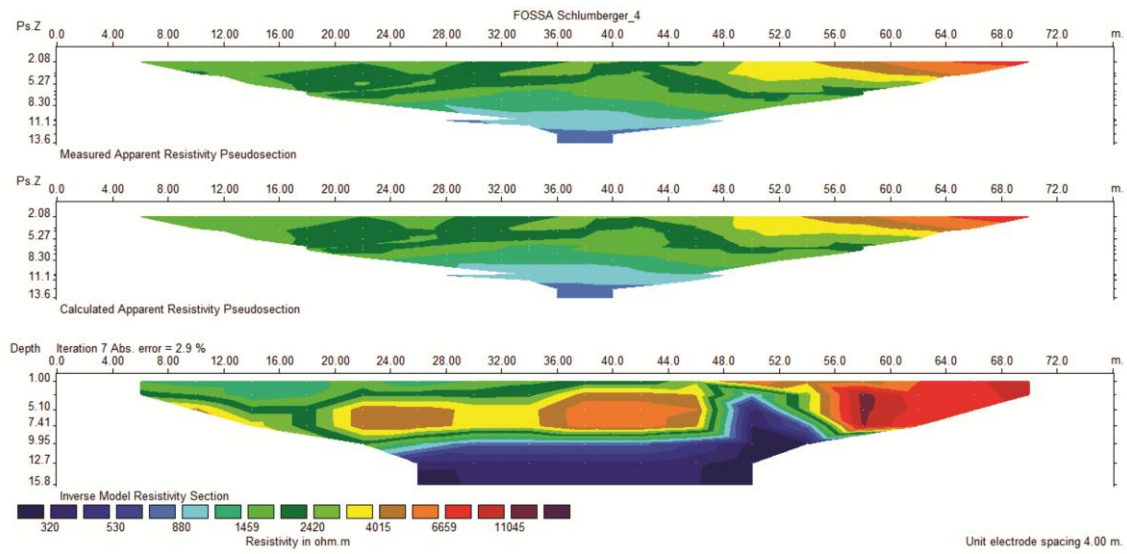


Figura 26. Modelo de inversão da linha quatro do arranjo Schlumberger.

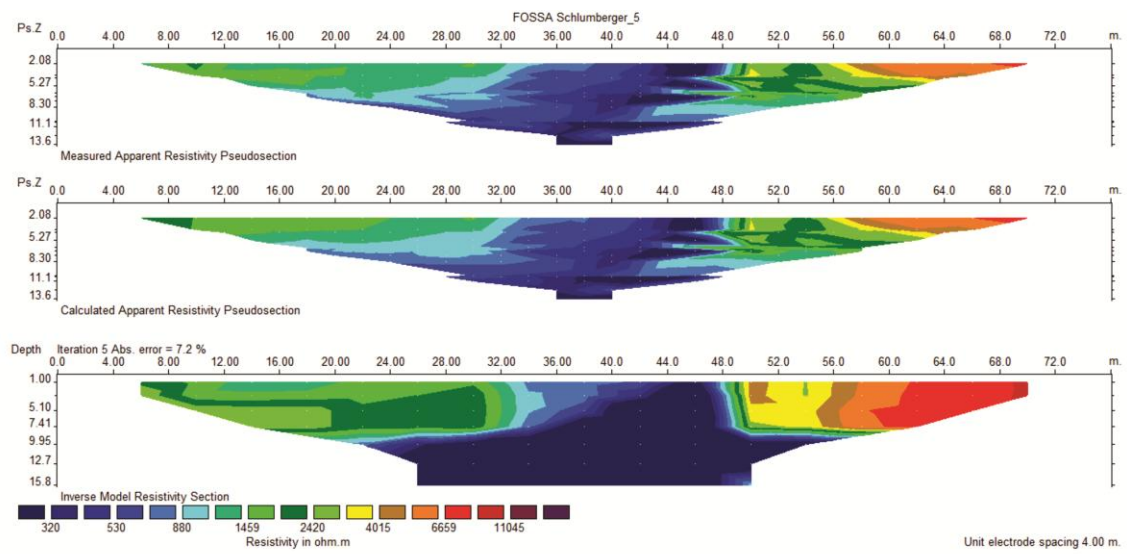


Figura 27. Modelo de inversão da linha cinco do arranjo Schlumberger.

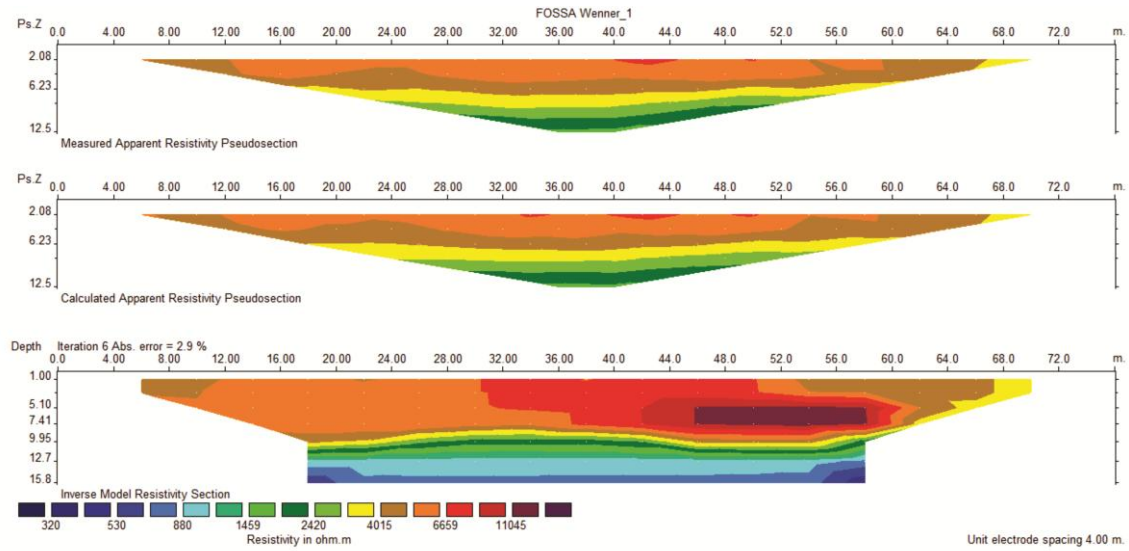


Figura 28. Modelo de inversão da linha um do arranjo Wenner.

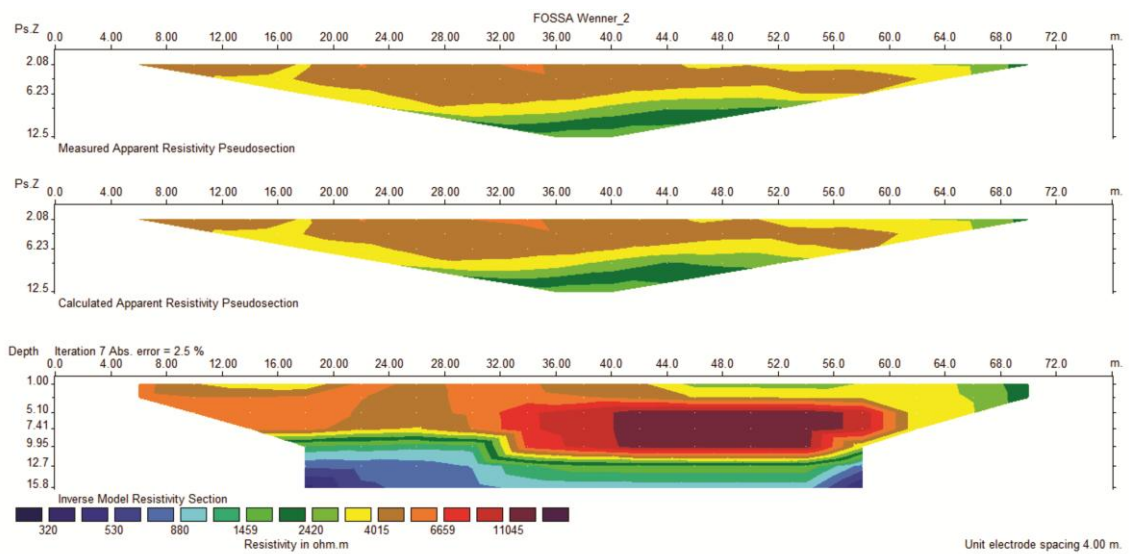


Figura 29. Modelo de inversão da linha dois do arranjo Wenner.

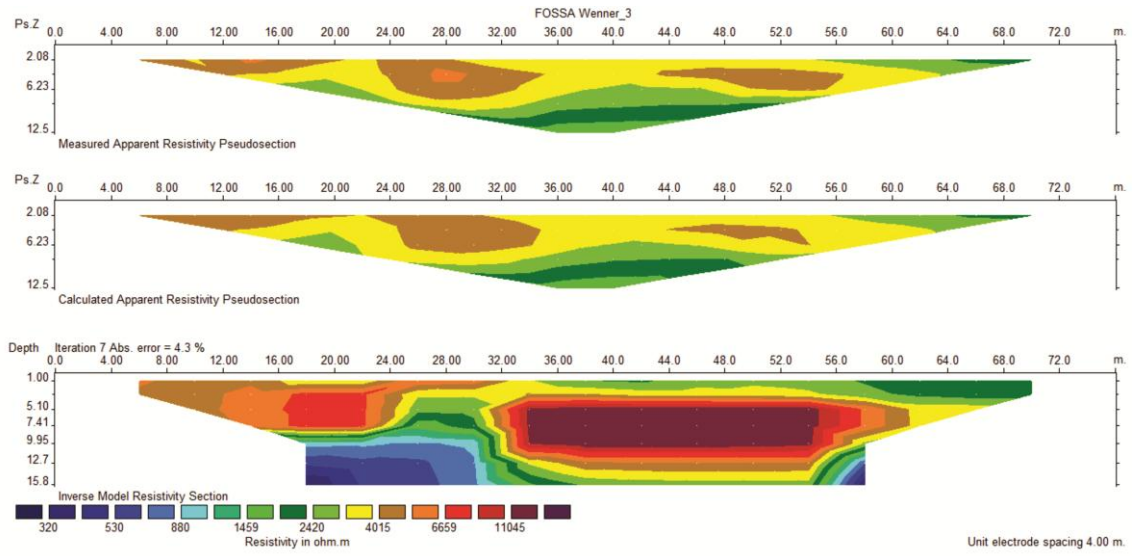


Figura 30. Modelo de inversão da linha três do arranjo Wenner.

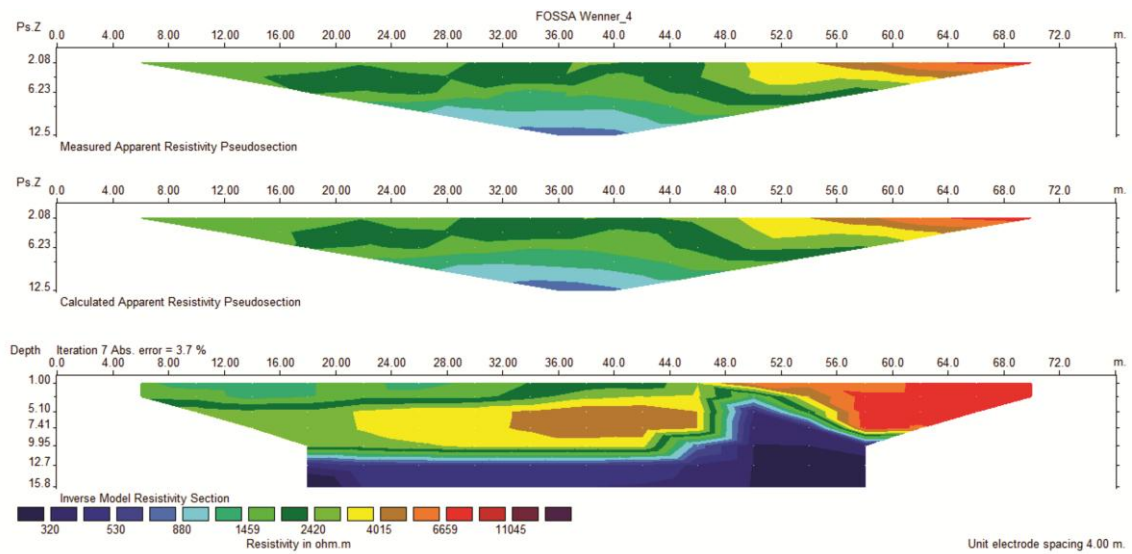


Figura 31. Modelo de inversão da linha quatro do arranjo Wenner

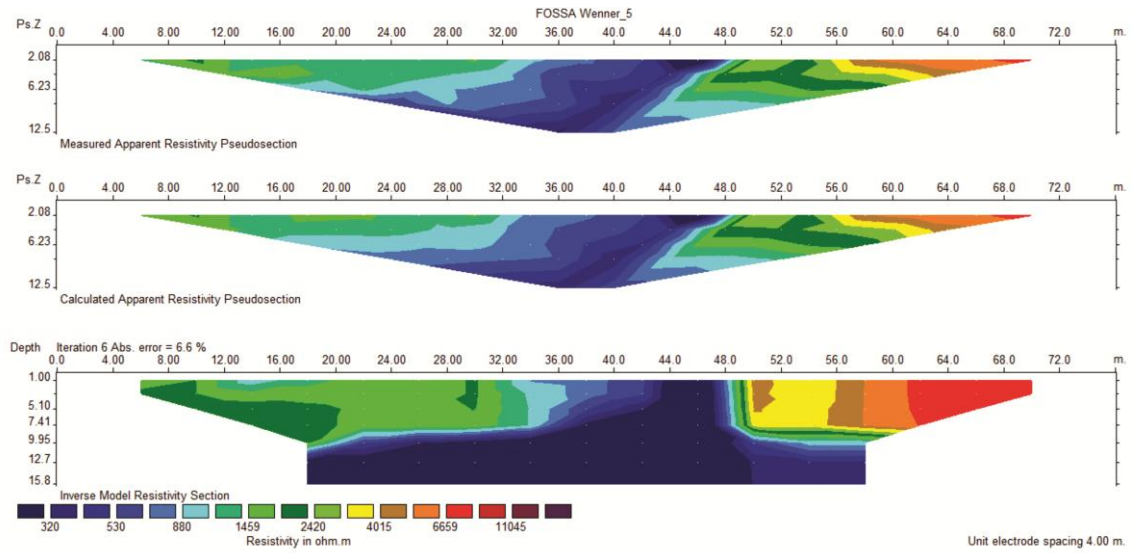


Figura 32. Modelo de inversão da linha cinco do arranjo Wenner.

REFERÊNCIAS

- ABEM. Terrameter LS User's Guide. n. 33, p. 42, 2012.
- AIZEBEOKHAI, A. P. et al. Effectiveness of 3D geoelectrical resistivity imaging using parallel 2D profiles. **Current Science**, v. 101, n. 8, p. 1036–1052, 2011.
- ARANGO-GALVÁN, C. et al. Structural pattern of subsidence in an urban area of the southeastern Mexico Basin inferred from electrical resistivity tomography. **Geofísica Internacional**, p. 401–409, 2011.
- BALEK, J. **Groundwater resources assessment**. New York: Elsevier, 1989.
- BARBOSA, O.; DE ANDRADE GOMES, F. **Pesquisa de petróleo na bacia do rio Corumbataí, Estado de São Paulo** Ministério da Agricultura, Departamento Nacional da Produção Mineral, Divisão de Geologia e Mineralogia, , 1958.
- BELMONTE-JIMÉNEZ, S. I. . et al. Characterization of a leachate contaminated site integrating geophysical and hydrogeological information. **Geofísica Internacional**, v. 51, n. 4, p. 309–321, 2012.
- BJORNBERG, A. J. S.; LANDIM, P. M. B. Contribuição ao estudo da formação Rio Claro (Neocenozóico). **Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia**, v. 15, n. 4, p. 43–67, 1966.
- BRAGA, A. C. O. **Métodos geoeletricos aplicados na caracterização geológica e geotécnica-Formações Rio Claro e Corumbataí no município de Rio Claro-SP**. Rio Claro: Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA, 1997.
- CETESB. Manual de gerenciamento de áreas contaminadas. **São Paulo: Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental**, 1999.
- CHAMBERS, J. E. et al. Electrical resistivity tomography applied to geologic, hydrogeologic, and engineering investigations at a former waste-disposal site. v. 71, n. 6, 2006.
- CLEARLY, R. W.; MILLER, D. W. Aspectos fundamentais e monitoramento de poluição de água subterrânea. **Fortaleza, CE, Anais**, v. 2, p. 313–330, 1984.
- COELHO, V. M. T. **Potencial de contaminação de aquífero freático por esgoto doméstico – quantificação do decaimento bacteriológico**. São Paulo: Tese de Doutorado. INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS, 2007.
- CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: Theory, principles, and guidelines. **Agronomy Journal**, v. 95, n. 3, p. 455–471, 2003.
- DAEE-DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. Estudo de Águas Subterrâneas: Região Administrativa 5-Campinas. 1981.
- DAHLIN, T. Short note on electrode charge-up effects in DC resistivity data acquisition using

- multi-electrode arrays. **Geophysical Prospecting**, v. 48, n. 1, p. 181–187, 2000.
- DELGADO-RODRÍGUEZ, O. et al. Joint interpretation of geoelectrical and volatile organic compounds data: a case study in a hydrocarbons contaminated urban site. **Geofísica Internacional**, v. 53, n. 2, p. 183–198, abr. 2014.
- DENA O., O. S. et al. Using subsurface geophysical methods in flood control: A resistivity survey to define underground storage capacity of a sand body in Ciudad Juárez, Mexico. **Geofísica internacional**, v. 51, n. 3, p. 225–249, 2012.
- ELGZELI, Y. M. et al. Impacts of heavy groundwater pumping on hydrogeological conditions in Libya: Past and present development and future prognosis on a regional scale. **Acta Geologica Polonica**, v. 63, n. 2, p. 283–296, 2013.
- FITTS, C. R. **Groundwater science**. London: Academic Press, 2002.
- FURMAN, A.; FERRE, T. P. A.; WARRICK, A. W. A Sensitivity Analysis of Electrical Resistivity Tomography Array Types Using Analytical Element Modeling. **Vadose Zone Journal**, v. 2, n. 3, p. 416–423, 2003.
- GANDOLFO, O. C. B. **Um Estudo Do Imageamento Geométrico Na Investigação Rasa**. São Paulo: Tese de Doutorado. INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS, 2007.
- GRIFFITHS, D. ; BARKER, R. . Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. **Journal of Applied Geophysics**, v. 29, n. 3-4, p. 211–226, abr. 1993.
- HERNÁNDEZ-SORIANO, M. C. **Environmental Risk Assessment of Soil Contamination**. 1. ed. New York: InTech, 2014.
- HISCOCK, K. **Hydrogeology: principles and practice**. 1. ed. Oxford: Blackwell publishing, 2009.
- IRITANI, M. A.; EZAKI, S. **As águas subterrâneas do Estado de São Paulo**. 3. ed. ed. São Paulo: Secretaria de Meio Ambiente, 2012.
- KNÖDEL, K.; LANGE, G.; VOIGT, H.-J. **Environmental geology: handbook of field methods and case studies**. 1. ed. Berlin: Springer, 2007.
- KÖNIG, L. F.; WEISS, J. L. **Groundwater: modelling, management and contamination**. 1. ed. New York: Nova Science Publishers, 2009.
- LJHT, J. et al. **Handbook of complex environmental remediation problems**. 2. ed. New York: McGraw-hill, 2002.
- LOKE, M. H.; BARKER, R. D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. **Geophysical prospecting**, v. 44, n. 1, p. 131–152, 1996.
- MATHEW, M. et al. Anatomy of an urban waterbody: A case study of Boston's Muddy River. **Environmental Pollution**, v. 159, n. 8-9, p. 1996–2002, 2011.

- MELO, M. S. DE; COIMBRA, A. M.; CUCHIERATO, G. Fácies sedimentares da Formação Rio Claro, neoceno-zóico da depressão periférica paulista. **Revista do Instituto Geológico**, v. 18, n. 1-2, p. 49–63, 1997.
- MILANI, E. J.; FRANÇA, A. B.; SCHNEIDER, R. L. Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da PETROBRÁS**, v. 8, n. 1, p. 69–82, 1994.
- MILSOM, J.; ERIKSEN, A. **Field geophysics**. 4. ed. Oxford: Wiley, 2011.
- MME, E. P. E. Balanço Energético Nacional 2013 - Relatório Final. p. 284, 2013.
- MONTANHEIRO, T. J.; YAMAMOTO, J. K.; KIHARA, Y. Características e propriedades pozolânicas de arenitos opalinos da serra de Itaqueri, SP. **Revista do Instituto Geológico**, v. 23, n. 1, p. 13–24, 2002.
- MOON, C. J. et al. **Introduction to mineral exploration**. 1. ed. Oxford: Blackwell publishing, 2006.
- MORAES, S. L. DE; TEIXEIRA, C. E.; MAXIMIANO, A. M. DE S. **Guia de elaboração de planos de intervenção para o gerenciamento de áreas contaminadas**. 1. ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2014.
- MOREIRA, C. A. et al. Geoelectrical prospection of disseminated sulfide mineral occurrences in Camaquã Sedimentary Basin, Rio Grande do Sul State, Brazil. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 30, n. 2, 2012.
- MOREIRA, C. A.; DOURADO, J. C.; BRAGA, A. C. O. Aplicação Da Técnica De Caminhamento Elétrico Em Área Contaminada Por Derivados De Petróleo. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 24, n. 2527, p. 383–392, 2006.
- MUSSETT, A. E.; KHAN, M. A. **Looking into the earth: an introduction to geological geophysics**. 1. ed. United Kingdom: Cambridge University Press, 2000.
- NEMEROW, N. L. et al. **Prevention and Response to Water-, Food-, Soil-, And Air-Borne Disease and Illness**. 6. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2009.
- OLIVA, A.; KIANG, C. H.; CAETANO-CHANG, M. R. Determinação da condutividade hidráulica da Formação Rio Claro: Análise comparativa através de análise granulométrica e ensaios Com permeâmetro guelph e testes de slug. **Águas subterrâneas**, v. 19, n. 2, 2005.
- OLIVA, A. & CHANG, H. K. MAPEAMENTO DO LENÇOL FREÁTICO NO MUNICÍPIO DE RIO CLARO (SP) EMPREGANDO A TÉCNICA. p. 27–34, 2007.
- PAGANINI, W. DA S. **Disposição de esgotos no solo: escoamento à superfície**. 1. ed. São Paulo: AESABESP, 1997.
- PEIRCE, J. J.; VESILIND, P. A.; WEINER, R. **Environmental pollution and control**. 4. ed. United States: Butterworth-Heinemann, 1998.
- SALEM, H. S. Modelling of lithology and hydraulic conductivity of shallow sediments from resistivity measurements using schlumberger vertical electric soundings. **Energy sources**, v.

23, n. 7, p. 599–618, 2001.

SAMOUËLIAN, A. et al. Electrical resistivity imaging for detecting soil cracking at the centimetric scale. **Soil Science Society of America Journal**, v. 67, n. 5, p. 1319–1326, 2003.

SARA, M. N. **Site assessment and remediation handbook**. 2. ed. London: CRC Press, 2003.

SCHNEIDER, R. L. et al. Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. **Congresso brasileiro de Geologia**, v. 28, n. 1974, p. 41–65, 1974.

SEQUEIRA GÓMEZ, L.; ESCOLERO FUENTES, O. The application of electrical methods in exploration for ground water resources in the River Malacatoya sub-basin, Nicaragua. **Geofísica internacional**, v. 49, n. 1, p. 27–41, 2010.

SOARES, P. C. Elementos estruturais da parte nordeste da Bacia do Paraná: classificação e gênese. **28 Congresso Brasileiro de Geologia**, v. 4, 1974.

TROPPEMAIR, H. Atlas da qualidade ambiental e de vida de Rio Claro-SP. **Rio Claro: UNESP**, 1992.

TWARDOWSKA, I.; ALLEN, H.; HAGGLOM, M. **Viable Methods of Soil and Water Pollution Monitoring, Protection and Remediation**. Dordrecht: Springer, 2006. v. 69

URRUTIA-FUCUGAUCHI, J. et al. Volcano-sedimentary stratigraphy in the Valsequillo Basin, Central Mexico inferred from electrical resistivity soundings. **Geofísica Internacional**, v. 53, n. 1, p. 87–94, jan. 2014.

ZHOU, Q. Y.; SHIMADA, J.; SATO, A. Three-dimensional spatial and temporal monitoring of soil water content using electrical resistivity tomography. **Water Resources Research**, v. 37, n. 2, p. 273–285, 2001.