

CONTRIBUIÇÕES AO USO DE MÉTODOS GEOFÍSICOS ELÉTRICOS E ELETROMAGNÉTICOS EM GEOCIÊNCIAS

César Augusto Moreira

Tese elaborada como parte dos
requisitos para obtenção do título de
Livre Docente pelo Instituto de
Geociências e Ciências Exatas da
Universidade Estadual Paulista

Rio Claro

2017

Faça o melhor ou nada

Agradecimentos

Esta tese reúne uma quantidade modesta de trabalhos de uma breve carreira, trajetória em que foram estabelecidas muitas parcerias e amizades. Neste sentido, somos gratos a todos os familiares e em especial a Sra. Fabiola Coutinho Servidoni Moreira, colegas de graduação e de pós-graduação, docentes orientadores e colegas de trabalho.

Muitos dos conhecimentos empregados hoje pelo autor em suas pesquisas e orientações são derivados do período de atuação como geólogo de lavra na Yamana Gold. Existem conhecimentos que não podem ser adquiridos em sala de aula e a prática ao lado de profissionais experientes num setor dinâmico e exigente em termos de produtividade, permitiu a autor compreender o significado de planejamento, foco, estabelecimento de objetivo e esforços para alcance de metas. Agradecemos a toda equipe de engenheiros, geólogos, técnicos e ajudantes pela paciência e profissionalismo.

O período bastante profícuo como docente na Universidade Federal do Pampa proporcionou um aprendizado inicial no magistério superior no ensino e docência, atividades em certa medida relegadas em segundo plano durante os anos de pós-graduação. O contato com docentes e servidores técnicos com grande experiência resultou em ganhos substanciais, aos quais somos gratos. As diversas orientações e participação em comissões e conselhos possibilitaram erros e acertos, por meio da compreensão e incentivo de muitos amigos. O autor compreende que o tempo numa empresa é diferente do tempo na universidade, onde a reflexão e a diplomacia fazem às vezes do ímpeto e da determinação (embora façamos uso de todas estas estratégias).

Atualmente como docente na Universidade Estadual Paulista e colega de trabalho dos mestres que conduziram os saberes geológicos durante a graduação é algo de grande responsabilidade, mas bastante prazeroso. Agradeço a todos os docentes e servidores técnicos que com respeito e dedicação fazem esta universidade funcionar e por um ambiente de trabalho onde reina a harmonia e respeito, que fazem diversos interesses convergir para a excelência dos cursos e da universidade.

A história inexiste na ausência do doador e mantenedor da vida, fonte do conhecimento, sabedoria, criatividade, persistência, determinação e paciência. Ao Eterno seja o louvor, glória, honra, majestade, domínio e o poder hoje e sempre. Que este servo haja a serviço do Altíssimo e do reino, purificado pelo sangue do Cordeiro e conduzido pelo vento do Espírito, até a consumação de seus dias.

Sumário

1 -	Contribuições de uso dos métodos geofísicos Elétricos e Eletromagnéticos em Geociências	9
2 -	Estudos ambientais	12
2.1 -	Estudos em contaminações por compostos orgânicos	12
2.2 -	Estudos em contaminações por compostos inorgânicos	22
2.3 -	Estudos para aproveitamento energético de Biogás de aterros	26
3 -	Pesquisa Mineral	33
3.1 -	Trabalhos desenvolvidos na Bacia Sedimentar do Camaquã (regiões de São Sepé e Caçapava do Sul – RS)	34
3.2 -	Trabalhos desenvolvidos no Complexo Amparo e Grupo Itapira (Itapira – SP) e Complexo Silvianópolis (Natércia e Heliadora – MG)	49
4 -	Estudos Geotécnicos	57
4.1 -	Estudos em aterro sanitário	57
4.2 -	Estudos em barragens	59
4.3 -	Estudos em mineração	61
5 -	Estudos hidrogeológicos	64
6 -	Considerações finais	68
7 -	Perspectivas futuras	70
8 -	Referências bibliográficas	73

Lista de Figuras

2.1 -	Mapa de localização da área industrial com linhas GPR, poço de infiltração de resíduos e poços de monitoramento (Moreira & Dourado, 2007).	13
2.2 -	Seções de GPR para a área contaminada de Araras (SP) de 1998 (acima) e 2003 (abaixo) (Moreira & Dourado, 2007).	14
2.3 -	Mapas de condutividade aparente de 1992 para até 15m profundidade (A) e para até 30m profundidade (B). Mapas de condutividade aparente de 2003 para até 15m profundidade (C) e para até 30m profundidade (D) (Moreira <i>et al.</i> 2007).	15
2.4 -	Mapas de condutividade aparente de 1992 para até 30m profundidade (E) e para até 60m profundidade (F). Mapas de condutividade aparente de 2003 para até 30m profundidade (G) e para até 60m profundidade (H) (Moreira <i>et al.</i> 2007).	16
2.5 -	Mapa de localização da área industrial com linhas imageamento elétrico, poço de infiltração de resíduos e de monitoramento (Moreira <i>et al.</i> 2006).	17
2.6 -	Linhas de imageamento elétrico (Linha LG acima e LB abaixo), com sentido de fluxo, posição do poço de injeção de efluentes e realce de zonas contrastante (Moreira <i>et al.</i> 2006).	18
2.7 -	Localização da área de estudos com e linhas de tomográfica elétrica. (a) curva de nível com acumulação de óleo. (b) remoção de solo (Veloso <i>et al.</i> 2015).	19
2.8 -	Modelos de visualização 3D de resistividade (acima) e cargabilidade (abaixo), com realce de intervalos espacialmente coincidente de alta cargabilidade e baixa resistividade (Veloso <i>et al.</i> 2015).	20
2.9 -	Localização da área de estudos, com fotos do local do acidente e caminho de escoamento do diesel vazado (canaleta de escoamento e canal de drenagem), além de linhas de tomografia elétrica e limites da contaminação em fase dissolvida em 2008 (Moreira <i>et al.</i> no prelo)	21
2.10 -	Modelo de visualização 3D de cargabilidade, com ajuste de isosuperfície de 20mV/V, nível freático e contato solo/saprolito (Moreira <i>et al.</i> no prelo)	22
2.11 -	Mapas de resistividade elétrica em aterro controlado, com limites das valas de resíduos e idades de fechamento (Moreira & Braga, 2009).	24
2.12 -	Mapas de cargabilidade em aterro controlado, com limites das valas de resíduos e idades de fechamento (Moreira & Braga, 2009).	24

2.13 -	Resultado estatístico entre resistividade elétrica e idade de fechamento de valas de resíduos, com ajuste de linha de tendência, equação de reta e tempo estimado para retorno ao padrão natural (Moreira <i>et al.</i> 2011).	25
2.14 -	Mapa de potencial elétrico natural, com sobreposição dos limites das valas de resíduos e idades de fechamento (Moreira <i>et al.</i> 2013).	26
2.15 -	Localização do aterro sanitário, com posição dos drenos de biogás estudados (Moreira <i>et al.</i> no prelo).	28
2.16 -	Pluviosidade anual e vazões de biogás para os drenos 5 e 28 (acima) e potencial elétrico natural (abaixo) (Moreira <i>et al.</i> no prelo).	29
2.17 -	Pluviosidade anual e vazões de biogás para os drenos 5 e 28 (acima) e potencial elétrico natural (abaixo) (Moreira <i>et al.</i> 2015).	29
2.18 -	Localização das linhas de tomografia elétrica em aterro sanitário, com posicionamento dos drenos de medida de biogás (Moreira <i>et al.</i> 2014).	30
2.19 -	Modelos de inversão de resistividade, com posição dos drenos de biogás e delimitação aproximada das áreas de influência de captação (Moreira <i>et al.</i> 2014).	31
2.20 -	Localização de linhas de tomografia elétrica em aterro sanitário entre área de influência de drenos de biogás (Moreira <i>et al.</i> 2015).	32
2.21 -	Modelos de visualização 3D de resistividade elétrica, com drenos nos extremos da área e suas respectivas vazões de biogás (em m ³ /h). (Moreira <i>et al.</i> 2015).	32
3.1 -	Linhas de aquisição em disposição azimutal, com centro do arranjo posicionado sobre a ocorrência mineral do Capão Grande (Moreira & Ilha, 2011).	35
3.2 -	Modelos de inversão das linhas de imageamento elétrico em disposição azimutal para a ocorrência do Capão Grande (Moreira & Ilha, 2011).	36
3.3 -	Modelos de visualização 3D de resistividade elétrica para a ocorrência do Capão Grande Modelo 3D de resistividade (Moreira & Ilha, 2011).	37
3.4 -	Localização da ocorrência de cobre Colônia Santa Bárbara, com linhas de imageamento elétrico e furo de sondagem (Moreira <i>et al.</i> 2012).	39
3.5 -	Modelos de visualização 3D de resistividade (esquerda) e cargabilidade (direita), com visão no sentido N40°, posição sondagem testemunhada disposição das linhas de imageamento elétrico (Moreira <i>et al.</i> 2012).	39
3.6 -	Limites do gabro Santa Catarina e demais unidades geológicas, com ponto de amostragem de sedimento de corrente e linhas de imageamento (Moreira <i>et al.</i> 2014).	40

3.7 -	Modelos de inversão de resistividade e cargabilidade para a área do gabro Santa Catarina, com realce de áreas com provável mineralização (Moreira <i>et al.</i> 2014).	41
3.8 -	Ocorrência de cobre Vitor Teixeira, com disposição das linhas de tomografia elétrica (Carneiro, 2016).	42
3.9 -	Mapas de resistividade e cargabilidade para até 30m de profundidade, com ocorrência de cobre no centro dos mapas (Carneiro, 2016).	43
3.10 -	Mapas de resistividade e cargabilidade entre 40m e 70m de profundidade, com ocorrência de cobre no centro dos mapas (Carneiro, 2016).	44
3.11 -	Localização da ocorrência na mina do Cerrito do Ouro, com disposição das linhas de tomografia elétrica (Moreira <i>et al.</i> 2016).	44
3.12 -	Modelos de visualização 3D de resistividade e cargabilidade, com ajuste de isosuperfície de 2500Ω.m e 30mV/V (Moreira <i>et al.</i> 2016).	46
3.13 -	Localização da ocorrência de cobre do Capão Grande, com disposição das linhas de tomografia elétrica (Côrtez <i>et al.</i> 2016).	47
3.14 -	Modelos de isosuperfície 3D de alta resistividade (silicificação) e de baixa resistividade (sulfetação) (Côrtez <i>et al.</i> 2016)	47
3.15 -	Modelo de depósito epitermal de baixa sulfetação e zonas de alteração hidrotermais (Modificado de Pirajno, 1992) correlacionadas com os modelos 3D de resistividade e cargabilidade (Côrtez <i>et al.</i> 2016)	48
3.16 -	Mina do Cocho (manganês) em Itapira (SP), com disposição das linhas de imageamento elétrico (Moreira <i>et al.</i> 2012).	49
3.17 -	Modelos de inversão de resistividade elétrica e cargabilidade, com realce para áreas de baixa resistividade e alta cargabilidade, relacionada a zonas mineralizadas em frente de lavra na mina do Cocho (Moreira <i>et al.</i> 2012).	50
3.18 -	Modelos de visualização em blocos 3D de resistividade e cargabilidade, com vista frontal em mina de manganês (Moreira <i>et al.</i> 2012).	50
3.19 -	Reconhecimento geológico de campo. A) Granada muscovita xisto com realce para cristais de espessartita (Mn), verificados próximos de uma das ocorrências minerais estudadas. B) Impregnações de óxidos de manganês em perfil de solo sobreposto (Moreira <i>et al.</i> no prelo).	52
3.20 -	Ocorrência de manganês supergênico na região de Heliadora (MG), com posicionamento das linhas de tomografia elétrica (Moreira <i>et al.</i> no prelo).	52
3.21 -	Modelos de visualização 3D de resistividade e cargabilidade, com realce de áreas correlacionáveis a ocorrência mineral aflorante (Moreira <i>et al.</i> no prelo).	53

3.22 -	Localização da ocorrência na São Roque, com limites de superfície de manganês laterítico e linhas de tomografia elétrica (Vieira <i>et al.</i> 2016).	55
3.44 -	Integração de resultados geofísicos e geológicos para a área da ocorrência São Roque. A) Modelos de inversão de cargabilidade mais representativos. B) Modelos de visualização 3D com linhas de tomográfica elétrica. C) Limites entre superfície laterítica e mineralização primária estimada na região central (Vieira <i>et al.</i> 2016).	56
4.1 -	Modelos de inversão de resistividade com topografia ajustada, com realce para zonas de acúmulo de chorume (áreas drenantes), pontos de nascente (surgência) e zonas de fluxo para o aquífero (Moreira <i>et al.</i> 2013).	58
4.2 -	Modelos de inversão de resistividade para barragem de Cordeirópolis, com realce do topo rochoso e zonas de infiltração (Camarero, 2016).	60
4.3 -	Modelos de visualização 3D de resistividade elétrica com isosuperfícies de baixa resistividade (Camarero, 2016).	61
4.4 -	Modelos de visualização 3D dos arranjos Dipolo-dipolo, Schlumberger e Wenner, com posicionamento das linhas de aquisição e vista parcial de metandesito em frente de lavra, com realce de zonas ricas e pobres em sulfetos (Moreira <i>et al.</i> no prelo).	63
4.5 -	Cruzamentos entre parâmetros geoeletricos e hidráulicos para o aquífero livre de Caçapava do Sul (RS), com linha de tendência, equação da reta, coeficiente de determinação R ² (Moreira <i>et al.</i> 2012).	65
4.6 -	Vazão versus resistividade, com linha de tendência, equação da reta, coeficiente de determinação (Moreira <i>et al.</i> 2013).	65
4.7 -	Modelo de pluma de contaminação proveniente de fossa séptica e cone de depressão em poço de captação de água (Moreira <i>et al.</i> 2016).	66
4.8 -	Isosuperfícies 3D de 620Ω.m para os arranjos de aquisição em estudo, com posição da fossa séptica e do poço de captação de água (Moreira <i>et al.</i> 2016).	67

1 – Contribuições de uso dos métodos geofísicos Elétricos e Eletromagnéticos em Geociências

Este material sistematiza a produção do autor quanto a contribuições ao avanço científico em diferentes aplicações de métodos geofísicos Elétricos e Eletromagnéticos em áreas das Geociências, como estudos ambientais, hidrogeológicos e pesquisa mineral. São reunidos os artigos científicos que julgamos mais relevantes, além de produtos de orientação (monografias e dissertações de mestrado) produzidos e orientados pelo autor ao longo dos últimos 7 anos de carreira acadêmica na Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA e na Universidade Estadual Paulista – UNESP, relacionados a área de Geofísica Aplicada.

É digno de nota um breve esclarecimento acerca do uso de termos técnicos. Em alguns trabalhos é utilizado o termo *imageamento elétrico*, ao passo que em outros ocorre o termo *tomografia elétrica*. Ambos os casos fazem referencia a aquisições 2D, por meio de arranjos como Dipolo-dipolo, Wenner ou Schlumberger. Contudo, o primeiro termo faz referencia a aquisições por meio de sistemas de comutação manuais e leituras de dados individualizadas, enquanto que o segundo termo indica aquisições automáticas em sistemas multieletrodos, em conformidade com a terminologia adotada em trabalhos internacionais (*electric resistivity tomography* – ERT).

Os modelos 3D apresentados em diversos trabalhos resultam de inversões 2D e interpolações 3D, procedimento adaptado pelo autor baseado em conhecimentos adquiridos durante atuação como geólogo de lavra em mineração, baseado no modelamento estatístico de depósitos minerais a partir de dados químicos. Embora possam ser denominados de modelos *quase-3D* ou *quasi-3D*, conforme diversos trabalhos geofísicos, o autor adota do termo *modelo de visualização 3D*, em concordância com livros de modelagem 3D de dados em Geociências.

Há uma tentativa de preferencia ao termo *assinatura geofísica* ou *assinatura geoeletrica* de restrição ao termo *anomalia geofísica*, este último adotado apenas nos primeiros trabalhos do autor. O termo *anomalia* em geoquímica serve para realçar valores quantificados que estejam acima de médias ou padrões de referencia replicáveis para qualquer área, desde que seguido protocolos analíticos. Em diversas situações de uso dos métodos Elétricos e Eletromagnéticos são realizadas medidas indiretas e de forma qualitativa, onde as variáveis frequentemente são condicionadas a elementos

geológicos e antrópicos locais, além das propriedades físicas de relevância nestes casos, apresentarem uma ampla gama de variação em materiais geológicos que muitas vezes restringe padronizações, conforme atestado em diversos livros textos em geofísica.

O termo *diagnóstico* foi tomado emprestado das ciências médicas, onde é aplicado ao conjunto de métodos de investigação indireta na geração de imagens (ressonância, tomografia, raio-X). O uso deste termo nos trabalhos do autor implica numa análise integrada com dados geológicos e geoquímicos, quase sempre relacionado a estudos ambientais, onde os processos de dispersão, diluição e degradação de contaminantes em solo e água subterrânea, implicam numa dinâmica complexa e temporalmente mutável. Neste sentido, os produtos geofísicos revelam um panorama momentâneo do alvo estudado, passível de monitoramento devido a alterações em propriedades físicas com o tempo, em semelhança ao diagnóstico no corpo humano.

A *caracterização* em suas diversas aplicações expressa um conjunto de elementos em termos de propriedades físicas, feições geológicas ou dados geoquímicos, que permitem uma associação entre modelos geofísicos com estruturas geológicas. A *arquitetura* de ocorrências ou depósitos minerais é um termo emprestado da engenharia civil e tenta expressar um conjunto de elementos morfológicos e volumétricos gerados a partir de dados geofísicos, avaliados sob a ótica de modelos de gênese de depósitos minerais, como zonas de alta resistividade com silicificações ou zonas de alta cargabilidade com sulfetações (disseminados ou vênulas em *boxwork*).

A sequência dos trabalhos e discussões apresentadas no texto procura seguir o histórico de pesquisas realizadas e orientações acadêmicas desenvolvidas pelo autor. São abordados de forma sintética e objetiva apenas os trabalhos científicos e produtos acadêmicos que julgamos mais relevantes. Esta abordagem consiste numa apresentação dos objetivos e área de estudos, com apresentação dos resultados em figuras, discussões e conclusões de cada trabalho. Recomendamos a consulta dos artigos originais diante de eventuais dúvidas ou interesse em detalhamentos.

O capítulo inicial trará de estudos ambientais em contaminações de solo e água subterrânea por derivados de petróleo em área industrial, por chorume proveniente da degradação de matérias em aterros sanitário e controlado (Capítulo 2.1).

Na sequência são abordados trabalhos relativos à pesquisa mineral de minérios metálicos (cobre, ouro e manganês) em ocorrências minerais localizadas nas regiões de Caçapava do Sul e São Sepé (RS) e Heliódora e Natércia (MG) (Capítulo 2.2).

Posteriormente são tratados de estudos integrados de geofísica e geotecnia em áreas de aterro sanitário, barragens de terra e em mineração (Capítulo 2.3). Ao final são discutidos alguns trabalhos desenvolvidos em estudos hidrogeológicos (Capítulo 2.4).

As considerações finais tentam resumir os produtos acadêmicos e científicos de atuações do autor em Geociências e suas considerações críticas quanto às contribuições em termos científicos e tecnológicos (Capítulo 3). As perspectivas futuras descrevem em linhas gerais os planos e projetos de atuação do autor em projetos individuais e grupos de pesquisa, além de atuações em gestão universitária (Capítulo 4).

2 - Estudos ambientais

2.1 – Estudos em contaminações por compostos orgânicos

O uso crescente de derivados de petróleo em processos industriais proporciona a geração de uma diversidade de produtos cada vez mais utilizados pela sociedade atual. Uma das consequências negativas do uso e manipulação de hidrocarbonetos é a geração de resíduos e efluentes altamente poluidores. Os hidrocarbonetos são denominados compostos de fase líquida não aquosa (NAPLs), cujas diferenças nas propriedades físicas e químicas resultam na imiscibilidade em água (Newell *et al.* 1995; Lehr *et al.* 2001; König & Wess, 2009).

Quanto à densidade, os compostos de NAPLs podem ser divididos em duas classes: compostos de Fase Líquida Leve Não Aquosa – LNAPL, caracterizados por serem mais leves que a água, como benzeno, tolueno e xileno e compostos de Fase Líquida Densa Não Aquosa – DNAPL, caracterizados por serem mais densos que a água, como os organoclorados (Pankow & Cherry, 1996; Sara, 2003; Twardowska *et al.* 2006, Hernández-Soriano, 2014).

A destinação de resíduos industriais é um dos principais problemas ambientais da atualidade, pois muitas vezes não existem opções de reutilização e o transporte e disposição em locais adequados demanda elevados investimentos. Este fato tem resultado em ações nocivas, como o descarte indevido direto no solo, com graves consequências ao solo, aquíferos e recursos hídricos.

A CETESB é responsável no Estado de São Paulo por ações de controle e gerenciamento de áreas contaminadas, além de elaborar uma lista de áreas contaminadas e reabilitadas. A última atualização data de 2015 e apresenta um total de 5.376 áreas cadastradas como contaminadas ou reabilitadas (CETESB, 2015).

A identificação e o diagnóstico de áreas contaminadas por efluentes líquidos é um procedimento necessário afim de que seja possível a tomada de medidas de contenção da fonte poluidora e posterior remediação. O uso combinado de poços de amostragem e métodos geofísicos constitui uma das maneiras mais adequada para identificação e o monitoramento de áreas contaminadas. Este procedimento permite a locação de pontos de amostragem e monitoramento de forma objetiva.

A rapidez, precisão, versatilidade, custo relativamente menor em relação às técnicas diretas e o contraste de propriedades físicas entre áreas contaminadas e não contaminadas, são fatores que justificam aplicações de da geofísica nestes casos. Existem diversos estudos de caso de aplicação de métodos geofísicos Elétricos e Eletromagnéticos no diagnóstico e monitoramento de contaminações por hidrocarbonetos em solo e água subterrânea (Benson, 1995; Sauck 1998; Atekwana *et al.* 2000; Abdel Aal *et al.* 2006; Delgado-Rodriguez *et al.* 2006; Allen 2007; Porciúncula & Lima, 2011; Delgado-Rodriguez *et al.* 2014; Arango-Galván *et al.* 2016).

O autor desenvolveu uma série de estudos geofísicos durante o desenvolvimento de sua monografia de conclusão de curso e dissertação de mestrado (2003-2006), numa área industrial no município de Araras (SP).

A área foi ocupada por duas indústrias químicas entre 1980 e 1992. Em 1988 foi constatada a contaminação do solo e água subterrânea por 1,2 dicloroetano, benzeno, tolueno, xileno, sódio e cloreto. Em 1990 foi iniciado o monitoramento da área pela CETESB, por meio de diversos poços instalados na área industrial e adjacências, em conjunto com a aplicação de geofísica (CETESB, 1997; Aquino, 2000). Os estudos geofísicos desenvolvidos pelo autor consistiram inicialmente no uso do método de Radar de Penetração no Solo (GPR) numa análise comparativa com resultados prévios (Figura 2.1).

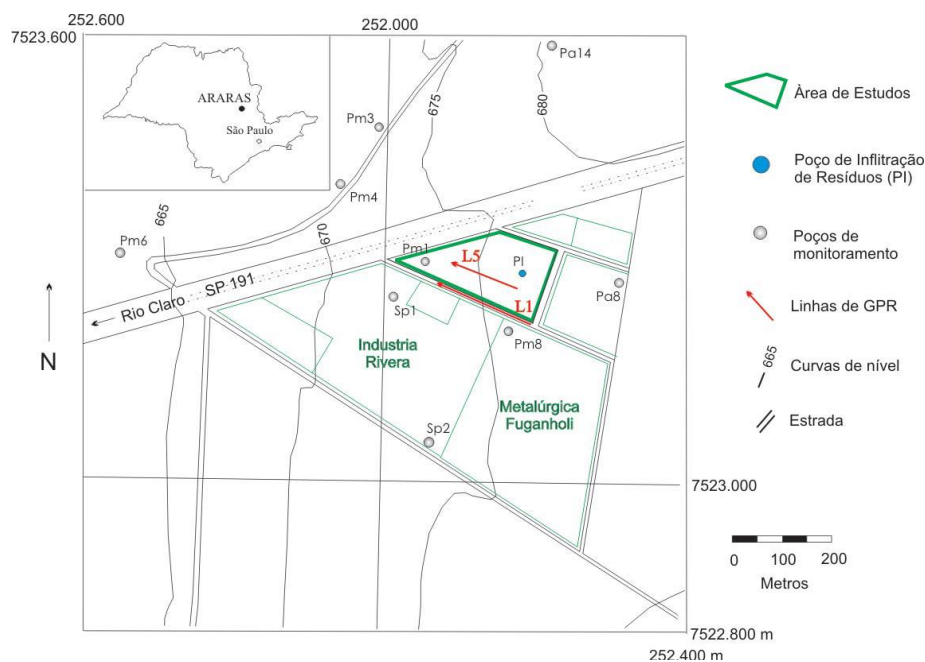


Figura 2.1 – Mapa de localização da área industrial com linhas GPR, poço de infiltração de resíduos e poços de monitoramento (Moreira & Dourado, 2007a).

A comparação entre seções de GPR de 1998 e 2003 permitiu concluir um avanço da pluma de contaminação no solo da ordem de 12,5 m no período, que resulta em um valor médio de permeabilidade hidráulica de $7,82 \times 10^{-6}$ cm/s, valor próximo ao obtidos em ensaios de permeabilidade hidráulica em poços, na ordem de 10^{-7} cm/s (Figura 2.2).

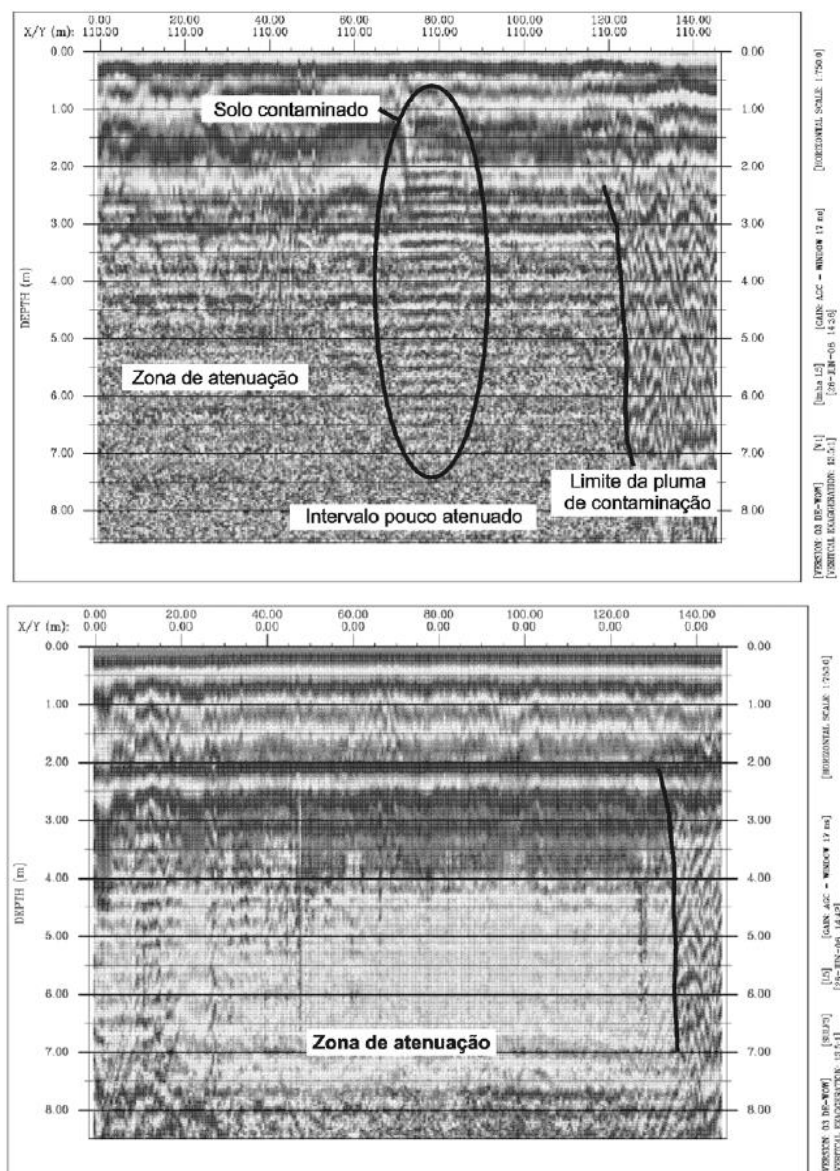


Figura 2.2 – Seções de GPR para a área contaminada de Araras (SP) de 1998 (acima) e 2003 (abaixo) (Moreira & Dourado, 2007a).

Numa tentativa de análise temporal da dispersão de poluentes nesta área, foram realizados levantamentos geofísicos por meio do método Eletromagnético no domínio da Frequência (FEM) em 2003, posteriormente comparado com resultados de estudos realizados em 1992.

A análise comparativa dos resultados de 1992 e 2003 revela que houve aumento nas dimensões da pluma de contaminação no intervalo de até 15m de profundidade, acompanhado de redução significativa nos valores de condutividade aparente próximo ao poço de infiltração, principalmente valores acima de 30mS/m (Figura 2.3).

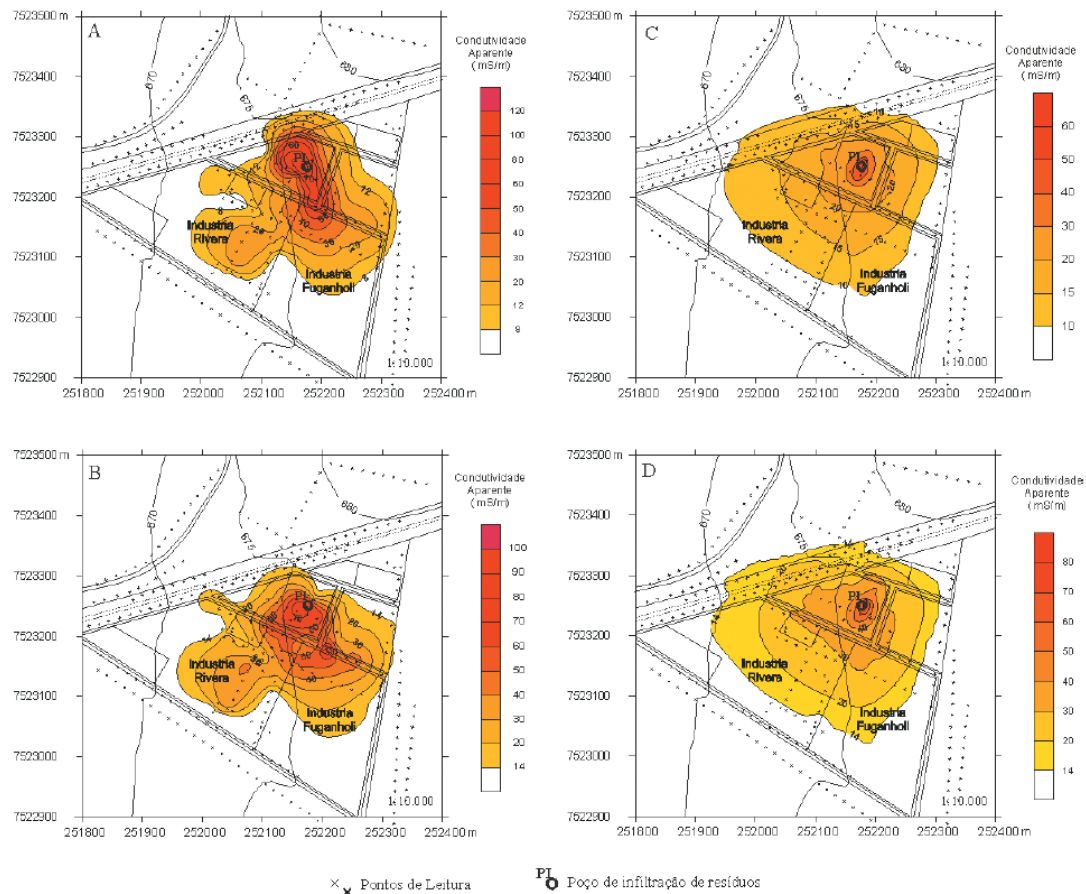


Figura 2.3 – Mapas de condutividade aparente de 1992 para até 15m profundidade (A) e para até 30m profundidade (B). Mapas de condutividade aparente de 2003 para até 15m profundidade (C) e para até 30m profundidade (D) (Moreira *et al.* 2007b).

A ausência de quaisquer sistemas de remediação da área e a seção da fonte poluidora em 1988 indica a vigência de processos de Atenuação Natural. Este processo um trabalho de remediação, que inclui uma variedade de processos físicos, químicos e biológicos, os quais, dentro de condições favoráveis, permitem a redução de massa, toxicidade, mobilidade, volume ou concentrações de contaminantes no solo ou água subterrânea sem intervenção humana (USEPA 1990, 1998). Este processo ocorre naturalmente em qualquer área contaminada, com variável grau de eficiência, dependendo dos tipos e concentrações de contaminantes presentes e dos processos físicos, químicos e biológicos característicos predominantes na área (USEPA 1999).

A redução nos valores de condutividade aparente é correlacionável a redução dos teores relativos de contaminação nesta profundidade. A ausência de novas contaminações após 1992, decomposição, diluição e dispersão são fatores que justificam este resultado. O aumento nas dimensões da pluma de contaminação neste intervalo de profundidade indica migração horizontal dos contaminantes de fase leve, concomitante ao fluxo da água subterrânea, seja sob a forma dissolvida ou fase livre. Os mapas para as profundidades de 30m e 60m revelam que houve um pequeno aumento nas dimensões da pluma de contaminações, concomitante aos valores relativos de condutividade aparente (Figura 2.4).

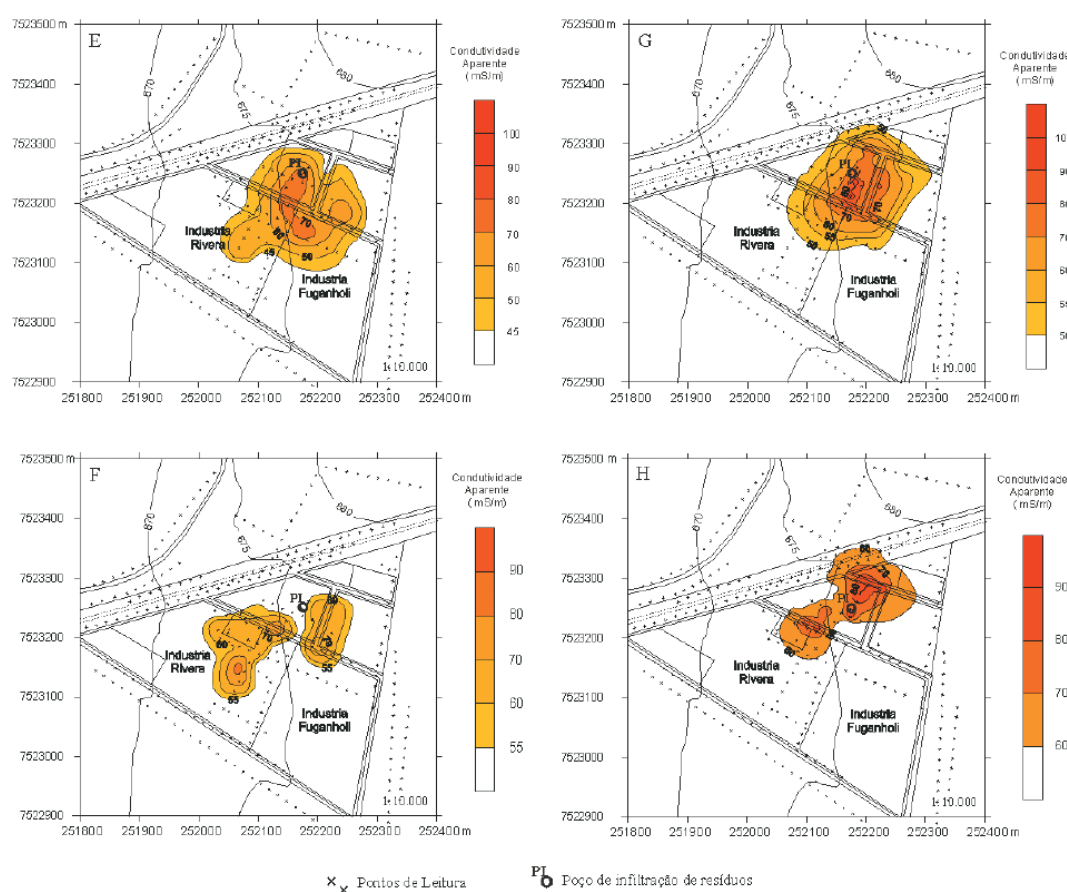


Figura 2.4 – Mapas de condutividade aparente de 1992 para até 30m profundidade (E) e para até 60m profundidade (F). Mapas de condutividade aparente de 2003 para até 30m profundidade (G) e para até 60m profundidade (H) (Moreira *et al.* 2007b).

Este fato está associado ao aumento nos teores de contaminação mesmo com o término de injeção de efluentes, associado ao comportamento dos compostos de fase densa, caracterizados pela elevada densidade em relação à água, que tendem a migrar no sentido vertical dentro do aquífero e que carregam elementos inorgânicos dissolvidos.

Estudos posteriores nesta mesma área visaram avaliar a resposta e a sensibilidade dos resultados de aplicação do método da Eletrorresistividade em decorrência da ação de processos de atenuação natural dos contaminantes orgânicos. Foram realizadas duas linhas de imageamento elétrico perpendiculares entre si, com a linha LB em cruzamento sobre o poço de injeção de resíduos e a linha LG a jusante do fluxo (Figura 2.5).

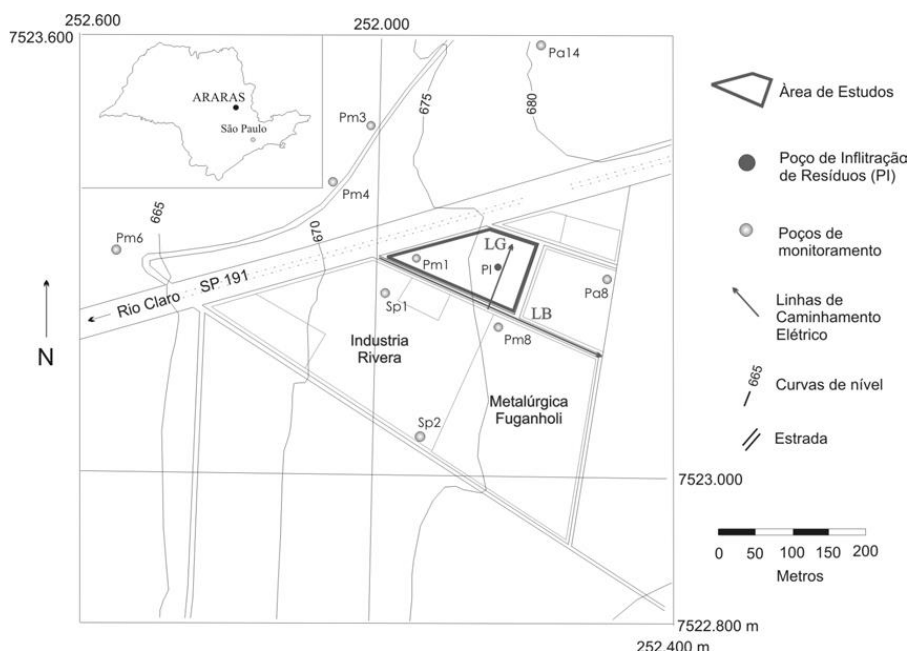


Figura 2.5 – Mapa de localização da área industrial com linhas imageamento elétrico, poço de infiltração de resíduos e de monitoramento (Moreira *et al.* 2006).

O corpo de baixa resistividade é possivelmente resultado de mudanças nas propriedades físicas do meio contaminado (Figura 2.6). A degradação de derivados de petróleo por metabolismo microbial produz uma variedade de subprodutos reativos – muitos dos quais interagem diretamente com solutos inorgânicos dissolvidos e minerais presentes. Estes subprodutos podem acelerar reações de dissolução e precipitação, complexação de íons metálicos em solução, alterações no estado de valência de íons metálicos e mobilização de metais solúveis (Harter, 1977; Hiebert & Bennett 1992).

A causa principal deste padrão de resistividade é a presença de íons dispersos no solo em quantidades superiores aos naturais para a área. Estes íons são produtos da corrosão de grão minerais que constituem o solo, por ataque de ácidos orgânicos.

A dissolução mineral pode desencadear processos como: geração de porosidade intragranular, que inibe a recuperação de íons metálicos e derivados de petróleo em

aquíferos de elevada porosidade (Stoessel & Pittman, 1990; Barth & Riis, 1992); dissolução de óxidos de ferro, que podem resultar na liberação de íons metálicos em determinados ambientes (McCabe *et al.* 1987); neoformação mineral e fechamento de espaços porosos previamente estabelecidos e modificação no padrão de circulação da água subterrânea, que dificultam a remediação (McMahon & Chapelle, 1991).

A área de alta resistividade praticamente restrita a porção inferior do poço de injeção de resíduos, pode indicar elevados teores de contaminação, predominantemente por compostos de fase densa em fase residual, pois a alta toxicidade dificulta a degradação por ataque de microorganismos. A área de alta resistividade é caracterizada pelo formato cônico, típico da dispersão de líquidos de fonte superficial (Figura 2.6).

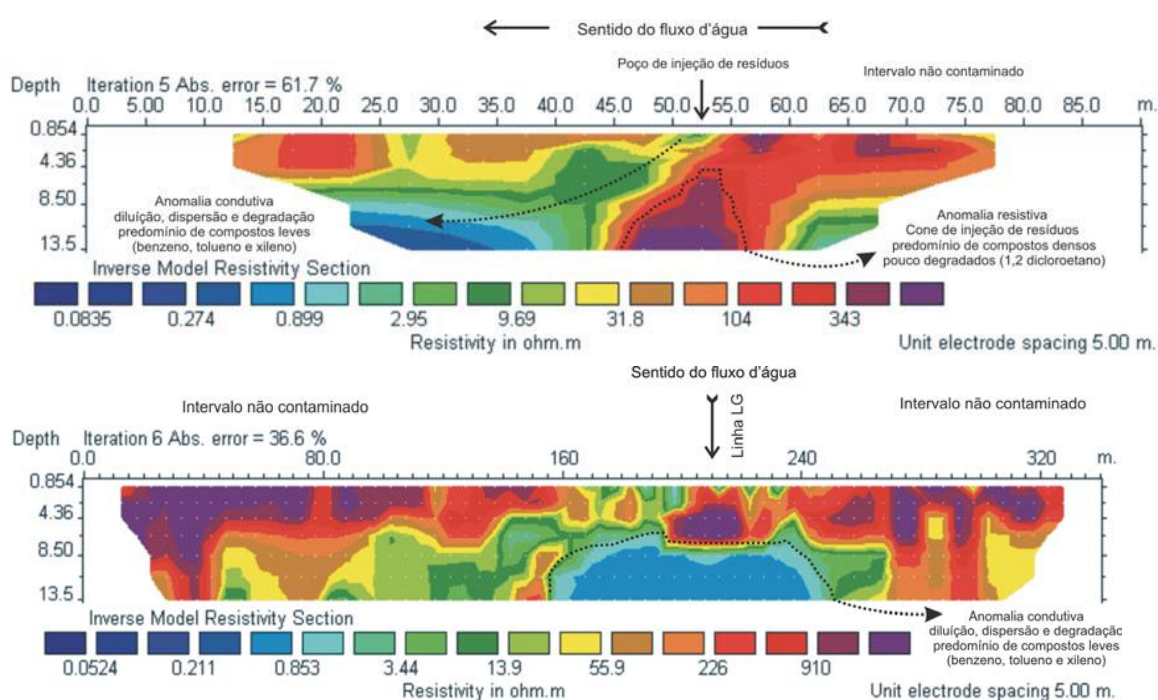


Figura 2.6 – Linhas de imageamento elétrico (Linha LG acima e LB abaixo), com sentido de fluxo, posição do poço de injeção de efluentes e realce de zonas contrastante (Moreira *et al.* 2006).

O autor ainda desenvolve atualmente pesquisa em áreas contaminadas por hidrocarbonetos oriundos de vazamento em acidentes ferroviários. Nesta linha foram orientados 1 monografia de conclusão de curso e 1 dissertação de mestrado, além de outras 2 dissertações em andamento.

A logística de transporte de hidrocarbonetos no sudeste do Brasil envolve oleodutos que interligam campos produtores aos parques de refino, que posteriormente

fazem uso de ferrovias para longas distâncias de transporte. Esta alternativa modal é particularmente relevante devido á possibilidade de movimentação de grandes volumes a um custo relativamente baixo (BRASIL, 2014). Neste contexto, acidentes ferroviários frequentemente resultam em contaminações de grande extensão e impacto ambiental.

Outro estudo de caso, realizado em Santa Ernestina (SP) na dissertação de mestrado intitulada “*Avaliação de contaminação com óleo diesel por meio dos métodos de eletrorresistividade e polarização induzida em Santa Ernestina – SP*” elaborada pelo Geólogo Dimitri Ilich Kerbauy Veloso, onde foi realizado estudo em área de acidente ferroviário com vazamento de 58.000l de diesel em 2007. A grande parte do combustível foi contida em curvas de nível, algo que restringiu o espalhamento, mas que proporcionou a infiltração de grande parte do poluente. Diversas campanhas de medição de gases do solo e de análises químicas até 2011 indicaram uma vasta de contaminação residual em solo seco e quase inexistente em fase dissolvida no aquífero.

O levantamento geofísico consistiu em diversas linhas de tomografia elétrica para leituras de resistividade elétrica e cargabilidade, posteriormente cruzadas com dados químicos e mapas de medição de gases do solo (Figura 2.7).

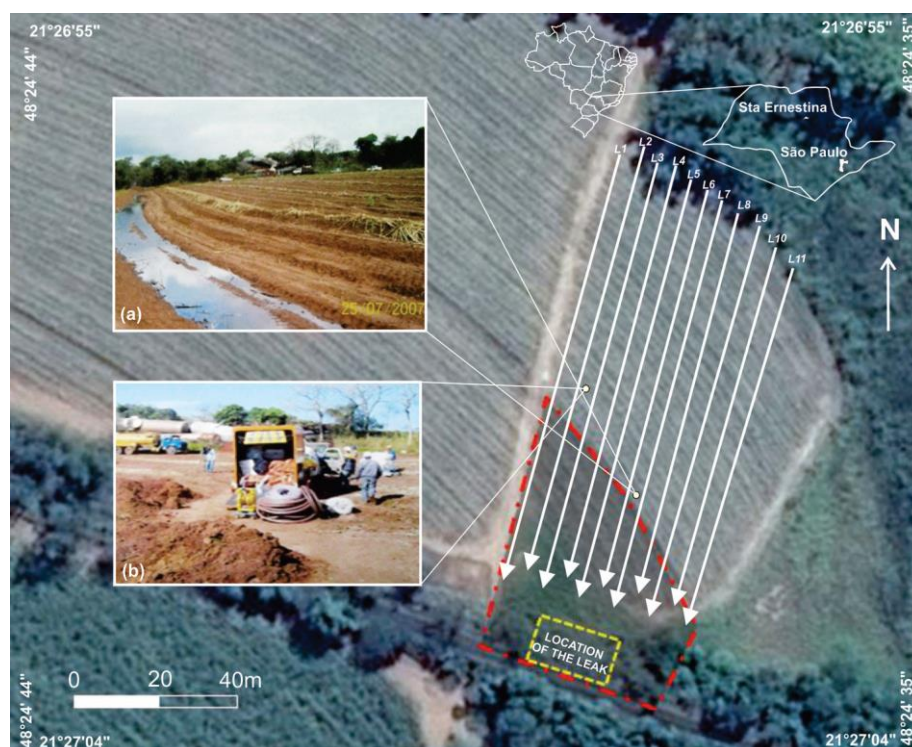


Figura 2.7 – Localização da área de estudos com e linhas de tomográfica elétrica. (a) curva de nível com acumulação de óleo. (b) remoção de solo (Veloso *et al.* 2015).

A análise integrada dos dados permitiu o diagnóstico de processos ocorridos em momentos distintos: dados de cargabilidade refletem um registro pretérito da degradação dos contaminantes numa área bastante abrangente e caracterizada pela possível existência de mineralizações sulfetadas neoformadas, ao passo que os dados de resistividade elétrica indicam um padrão condizente com áreas em estágio final de remediação, restrita a uma área comparativamente menor (Figura 2.8).

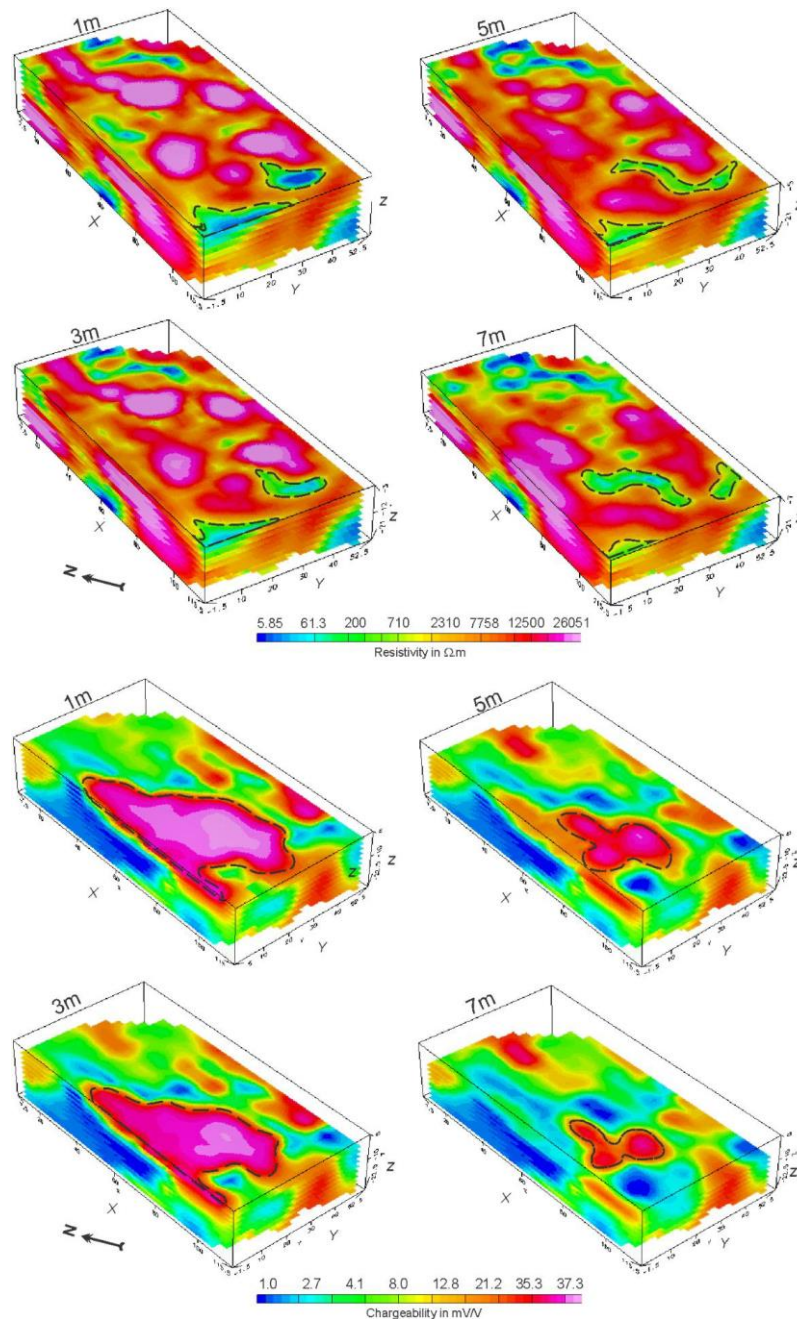


Figura 2.8 – Modelos de visualização 3D de resistividade (acima) e cargabilidade (abaixo), com realce de intervalos espacialmente coincidente de alta cargabilidade e baixa resistividade (Veloso *et al.* 2015).

Em estudo de caso realizado em São Manuel (SP) na monografia de conclusão de curso da engenheira ambiental Livia Portes Innocente Helene, foi realizada investigação geofísica em acidente ferroviário onde houve o vazamento de 240.000 litros de diesel em 1999 (Figura 2.9). A remoção superficial dos poluentes foi seguida pela instalação de poços de monitoramento para remediação em solo e água subterrânea, até o ano de 2011, quando a área do declarada descontaminada diante do enquadramento dos teores de poluentes no aquífero aos padrões de legislação.

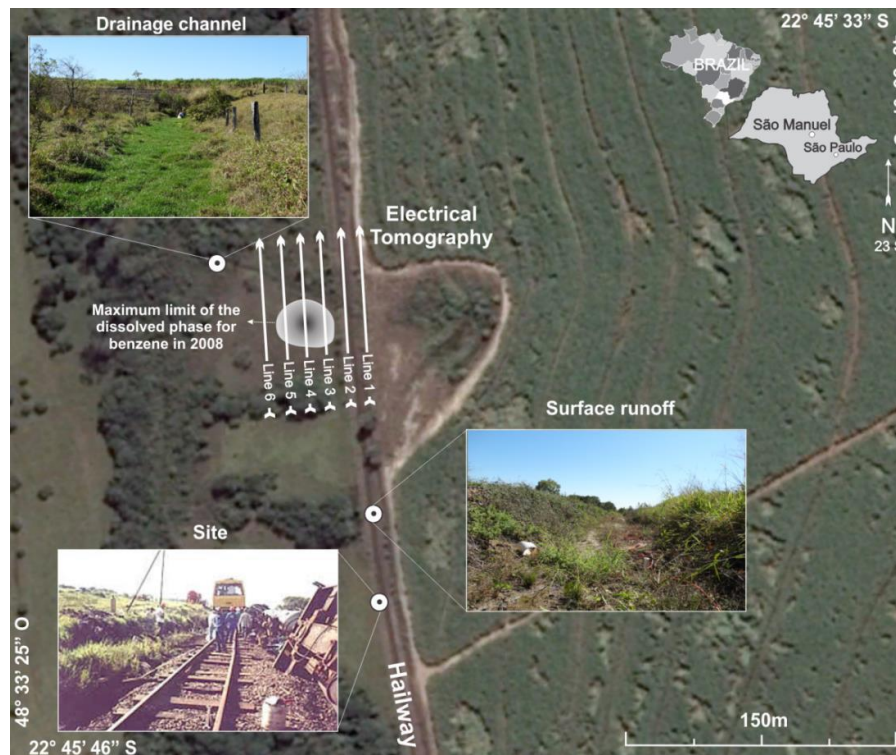


Figura 2.9 – Localização da área de estudos, com fotos do local do acidente e caminho de escoamento do diesel vazado (canaleta de escoamento e canal de drenagem), além de linhas de tomografia elétrica e limites da contaminação em fase dissolvida em 2008 (Moreira *et al.* no prelo)

O estudo geofísico em linhas de tomografia elétrica perpendiculares ao fluxo subterrâneo, com aplicação dos métodos da Eletrorresistividade e da Polarização Induzida. Os resultados indicaram contrastes de propriedades elétricas em relação à área próxima não contaminada, que sugerem a existência de hidrocarbonetos em fase residual no solo seco e saturado, além de indícios de avançado estado de degradação destes compostos diante da existência de zonas com mineralização sulfetada de alta cargabilidade e alta resistividade (Figura 2.10).

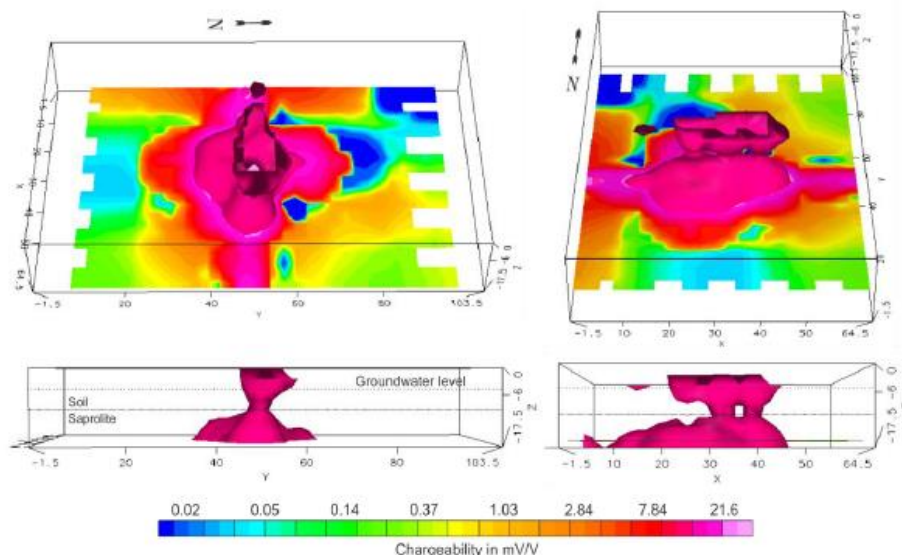


Figura 2.10 - Modelo de visualização 3D de cargabilidade, com ajuste de isosuperfície de 20mV/V, nível freático e contato solo/saprolito (Moreira *et al.* no prelo)

2.2 – Estudos em contaminações por compostos inorgânicos

A intensificação do convívio em cidades e a padronização das formas de fabricação e consumo são traduzidas no expressivo aumento da produção de resíduos sólidos, e constitui um grande desafio para os gestores públicos. As formas atualmente utilizadas para disposição final de resíduos sólidos podem ser resumidas em: incineração, compostagem, disposição em lixões e aterros tipo sanitário ou controlado.

Aterro é uma obra de engenharia que objetiva acomodar resíduos no menor espaço possível, com danos mínimos ao ambiente e à saúde pública. Essa técnica consiste na compactação de resíduos no solo, na forma de camadas que são periodicamente cobertas com solo ou outro material inerte (ABNT 1989). Os aterros são a principal forma empregada na disposição final de resíduos sólidos urbanos, resíduos de coleta seletiva, compostagem e incineradores.

O uso de métodos geofísicos para caracterização e monitoramento de áreas contaminadas ou potencialmente contaminadas por compostos inorgânicos possibilita a determinação de áreas em subsuperfície que eventualmente apresentem alterações em determinados parâmetros físicos devido à presença de contaminantes. Diversos trabalhos demonstram a possibilidade de mapeamento de áreas contaminadas por meio de geofísica aplicada devido à relação entre queda na resistência elétrica no ambiente

geológico em presença de chorume ou lixiviado (Moura & Malagutti Filho 2003; Mondelli *et al.* 2007; Moreira *et al.* 2009; Santos *et al.* 2009).

Esta temática foi escolhida para elaboração de Tese de Doutorado do autor, realizada num aterro controlado em Cordeirópolis (SP). Esta área recebia resíduos sólidos domiciliares, acondicionado em valas com duração média de 4 meses, em área ausente de quaisquer sistemas de impermeabilização ou coleta de gases e líquidos. Foram selecionadas valas com fechamento anual desde dezembro de 2001 a dezembro de 2007, para realização de uma série de estudos geofísicos numa tentativa de análise temporal das variações de parâmetros físicos elétricos (resistividade, cargabilidade e potencial elétrico natural), além de avaliar a aplicabilidade dos métodos Geoelétricos como ferramenta para previsão do termino da geração de chorume em aterros.

Os produtos deste estudo foram divulgados numa série de artigos científicos, dos quais são apresentados a seguir os resultados que julgamos de maior relevância.

Os resultados da integração de linhas de imageamento elétrico possibilitaram a definição de uma assinatura de baixa resistividade para as valas fechadas recentemente, com aumento progressivo dos valores no sentido das valas mais antigas, padrão atribuído à produção decrescente de chorume com o tempo (Figura 2.11). As valas recentes apresentaram elevada cargabilidade (Figura 2.12), que decrescem progressivamente no sentido das valas mais antigas, padrão atribuído ao ataque ácido (chorume) em grãos minerais do solo e materiais metálicos contidos nos resíduos, dissolução dos metais e neoformação de sulfetos minerais em condições redutoras.

Nesta área também foram realizadas 3 sondagens elétricas verticais (SEVs) ao longo do comprimento de cada vala de resíduos, com centros e eletrodos de potencial sempre posicionados dentro dos limites individuais das valas, com o objetivo de análise da espessura e variações da resistividade elétrica nos horizontes geoelétricos em profundidade e eventuais correlações com a idade de fechamento das valas.

Os resultados foram processados e os valores referentes aos níveis geoelétricos correspondentes foram cruzados com a idade de fechamento das valas, em gráficos de dispersão de pontos com ajuste de equação de reta e R^2 . A correlação entre o parâmetro físico no tempo e suas variações diretamente relacionadas à infiltração de chorume da base das valas não impermeabilizadas, possibilitou uma estimativa de tempo de término da geração e infiltração de chorume, diante da produção decrescente com o consumo da matéria orgânica contida nos resíduos (Figura 2.13).

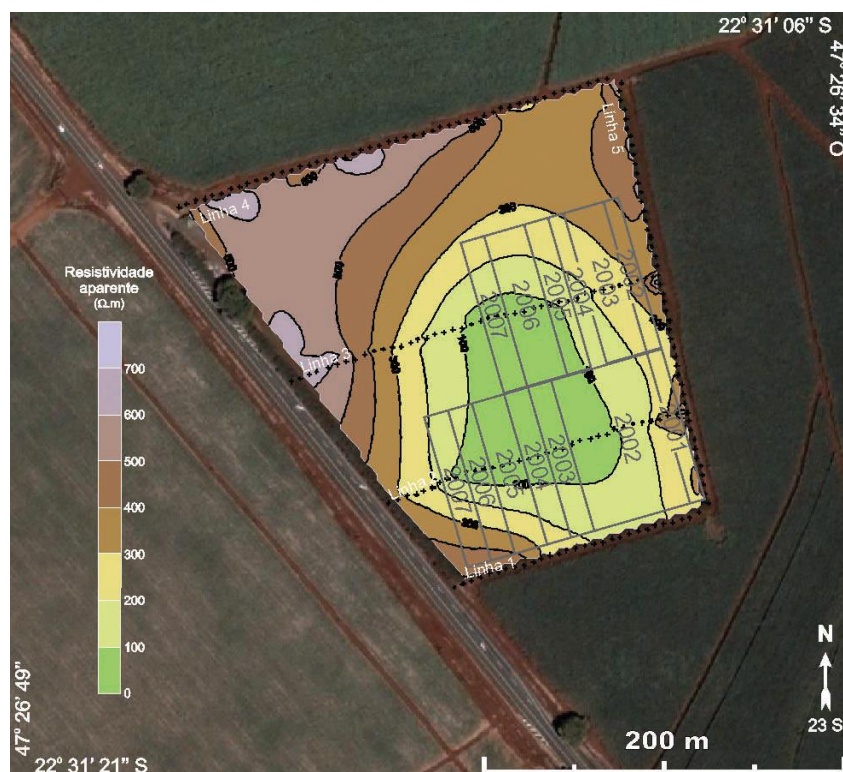


Figura 2.11 – Mapas de resistividade elétrica em aterro controlado, com limites das valas de resíduos e idades de fechamento (Moreira & Braga, 2009).



Figura 2.12 – Mapas de cargabilidade em aterro controlado, com limites das valas de resíduos e idades de fechamento (Moreira & Braga, 2009).

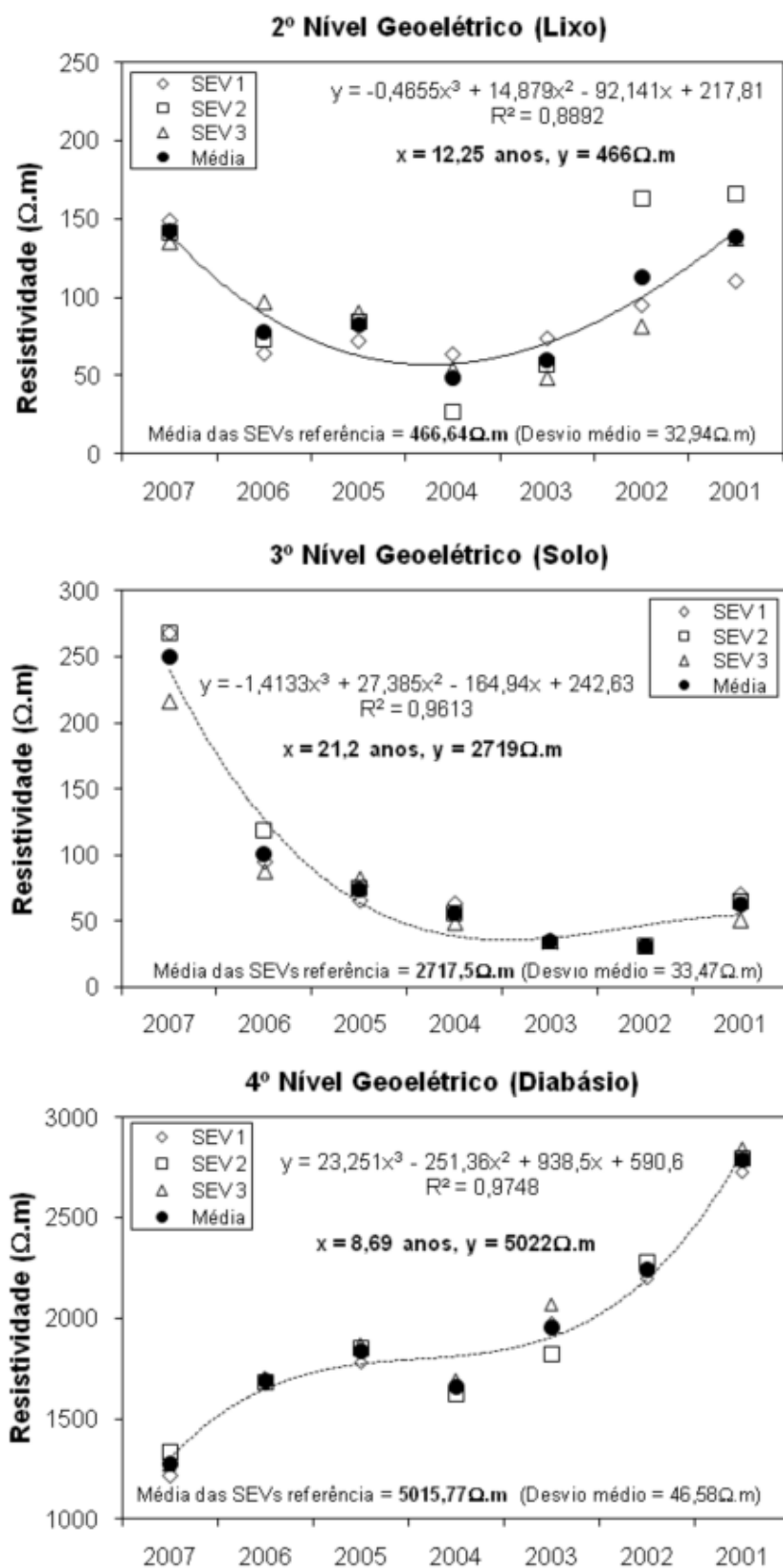


Figura 2.13 – Resultado estatístico entre resistividade elétrica e idade de fechamento de valas de resíduos em aterro, com ajuste de linha de tendência, equação de reta e tempo estimado para retorno ao padrão natural (Moreira *et al.* 2011).

Nesta área foi realizada medidas de potencial elétrico natural por aplicação do método de Potencial Espontâneo, numa tentativa de análise de relações entre variações de tensão e idade dos resíduos nas valas. Os resultados indicaram uma correlação direta entre potencial elétrico próximo a zero e valas recentemente fechadas, com tendência para valores positivos no sentido das valas mais antigas. Este padrão foi atribuído à intensa atividade biológica vigente em resíduos recentemente enterrados, onde o consumo da matéria orgânica envolve transferência de íons (O^-) e trânsito de elétrons. A intensidade deste fenômeno diminui proporcionalmente com o consumo da matéria orgânica no tempo, até o completo consumo destes materiais e a ocorrência de valores de potencial elétricos semelhantes ao padrão natural para a área (Figura 2.14).



Figura 2.14 – Mapa de potencial elétrico natural, com sobreposição dos limites das valas de resíduos e idades de fechamento (Moreira *et al.* 2013).

2.3 – Estudos para aproveitamento energético de Biogás de aterro sanitário

O aproveitamento dos recursos renováveis como fonte de energia limpa e sustentável ganha importância crescente diante de uma realidade de aumento do aquecimento global e de suas consequências, resultado da intensificação das emissões antrópicas de carbono na geração de energia elétrica, como termoeletrônica a carvão.

O biogás é uma mistura gasosa resultante da degradação anaeróbia da matéria orgânica dos resíduos sólidos depositados em aterros sanitários e dos efluentes industriais e esgotos domésticos tratados pelo processo anaeróbio. Este composto possui grande potencial de aproveitamento energético em termos nacionais, num cenário onde os aterros sanitários possuem expressiva relevância, como depósito de grandes quantidades de matéria orgânica (CETESB/SMA 2006).

Dentre as principais metodologias para estimativa de volume de produção de biogás em projetos de aproveitamento energético, merecem destaque a proposta do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 1996), para cenários estaduais ou nacionais, ou a proposta pela Agência Americana de Proteção Ambiental (USEPA, 1996), para unidades de tratamento ou acondicionamento de resíduos. Outras metodologias teóricas são encontradas em (Laquidara *et al.* 1986; Tchobanoglous *et al.* 1993; Oonk & Boon, 1995). Uma análise comparativa destas metodologias é realizada em Ensinas (2003), que as como inadequadas em estudo de geração em aterro, pelo uso de valores pré-estabelecidos ou simplesmente desconsiderarem fatores importantes como o potencial de geração de metano dos resíduos e a taxa de produção do biogás.

Os modelos matemáticos utilizados internacionalmente para estimativa da geração de metano em aterros sanitários não abarcam de forma satisfatória condições específicas dos resíduos e de clima brasileiros (Castro & Belo, 2010). A alta quantidade de matéria orgânica e biodegradabilidade dos resíduos, associadas a condições de elevada temperatura e precipitação, intensificam o processo de geração de gás nos primeiros anos, com exaustão em curto período em comparação a países de clima frio.

Este cenário é uma oportunidade para adaptação de métodos e técnicas de investigação que sejam sensíveis à presença de biogás em aterro e que possibilite tanto cobertura em áreas amplas como estudos de detalhe. A aplicação de métodos geofísicos nestes casos é um desafio com perspectivas promissoras, baseado no uso consagrado por décadas de perfilagem geofísica como ferramenta na identificação de estratos sedimentares com acúmulo de gás e óleo em campos petrolíferos.

O autor realizou uma série de estudos no aterro sanitário de Rio Claro (SP), que envolveu medidas da vazão e temperatura de biogás emanado de drenos instalados em áreas com diversas idades de disposição de resíduos sólidos, concomitante com levantamentos de Eletrorresistividade e Potencial Espontâneo por meio de perfilagem

elétrica, numa tentativa de avaliar a sensibilidade das ferramentas na detecção de zonas de acumulação e variações temporais na produção de biogás (Figura 2.15).



Figura 2.15 – Localização do aterro sanitário, com posição dos drenos de biogás estudados (Moreira *et al.* no prelo).

Um dos estudos de caso envolveu a seleção de 2 drenos de biogás que cruzam resíduos com idades distintas. O dreno 5 cruza resíduos mais antigo, cuja porção basal remonta ao início da operação do aterro, enquanto que o dreno 28 está localizado numa região com resíduos lançados recentemente. Nas proximidades dos dutos foram realizadas perfurações para instalação dos cabos elétricos, elaborados com sensores desenvolvidos a base de grafita, para aplicação da técnica de perfilagem geofísica a partir do arranjo Wenner para leituras de resistividade elétrica, e arranjo de base fixa e eletrodo de referencia em superfície para leituras de potencial elétrico natural. As medidas foram adquiridas com periodicidade quinzenal durante 12 meses.

Os resultados revelaram a influência das sazonalidades climáticas na vazão de biogás e a sensibilidade dos parâmetros físicos geoeletricos a tais variações. O potencial elétrico natural demonstrou variações proporcionais às vazões de biogás medidas em drenos com idades distintas no aterro sanitário estudado. A intensidade de degradação de matéria orgânica ou vazão de biogás é inversamente proporcional ao potencial elétrico natural, ou seja, as maiores vazões de biogás estão associadas a áreas mais eletronegativas ou mais redutoras (Figura 2.16).

Em semelhança ao caso das medidas de potencial elétrico natural, as medidas de resistividade elétrica também foram influenciadas por variações climáticas, visto que teor de umidade nos resíduos é condicionado a chuvas e secas e tais variações alteram a resistividade dos materiais. Em termos gerais, há uma correlação entre a produção de biogás e variações na resistividade elétrica, onde o dreno de maior vazão (dreno 28) apresentou os maiores valores de resistividade em termos comparativos com o dreno 5. Esta correlação é atribuída ao caráter de isolante elétrico dos gases em meio aos materiais do aterro (Figura 2.17).

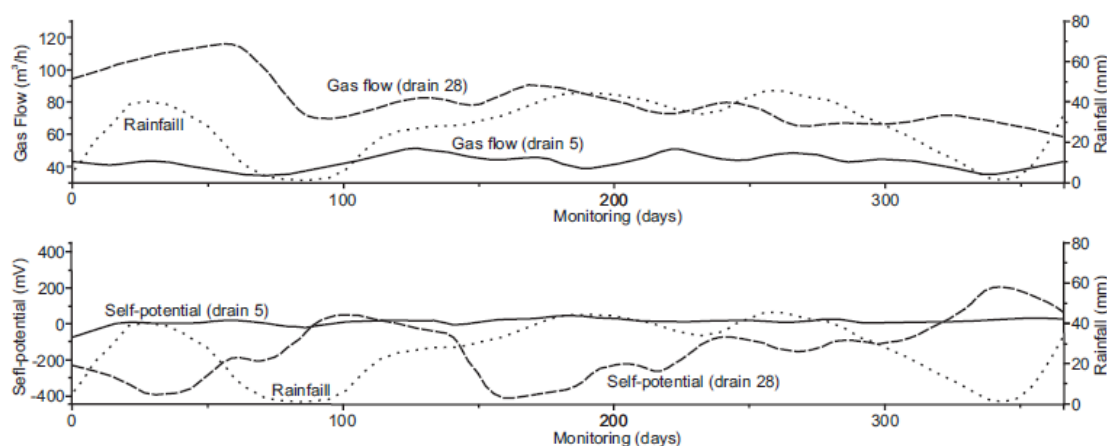


Figura 2.16 - Pluviosidade anual e vazões de biogás para os drenos 5 e 28 (acima) e potencial elétrico natural (abaixo) (Moreira *et al.* no prelo).

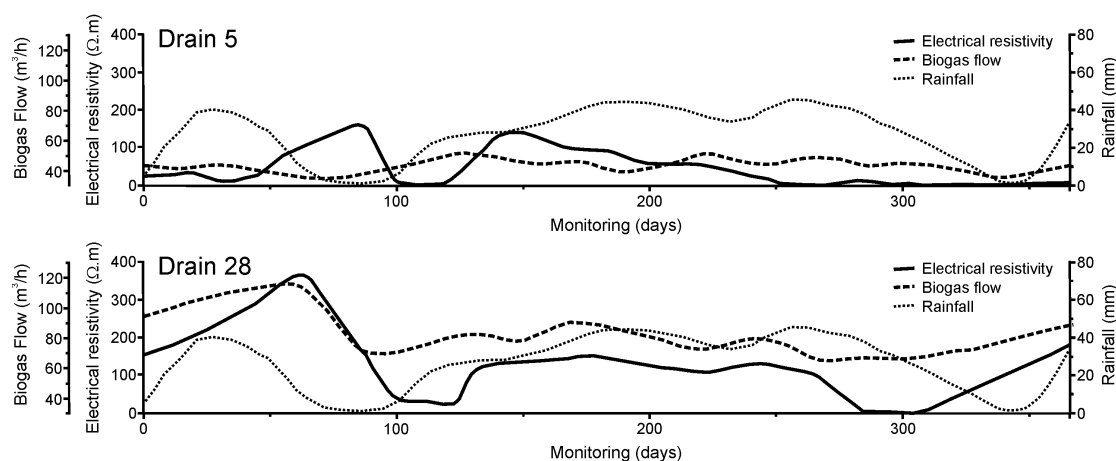


Figura 2.17 - Pluviosidade anual e vazões de biogás para os drenos 5 e 28 (acima) e potencial elétrico natural (abaixo) (Moreira *et al.* 2015).

Este conjunto de trabalho de monitoramento por meio de perfilagem geofísica resultou em dados de serviram de base para a continuidade de novos estudos. Em sequência foram realizadas linhas de tomografia elétrica para análise da resposta da

técnica na detecção de zonas de alta resistividade e suas relações com a vazão de biogás em drenos previamente medidos (Figura 2.18).



Figura 2.18 – Localização das linhas de tomografia elétrica em aterro sanitário, com posicionamento dos drenos de medida de biogás (Moreira *et al.* 2014).

Os dados revelam a heterogeneidade dos materiais em estudo, formado por horizontes variáveis de baixa resistividade, avaliado como zonas onde predominam o acúmulo de chorume, intercaladas com zonas de resistividade acima da média nas seções, avaliada como área de acúmulo de biogás. O estudo revelou que a vazão de biogás nos drenos é condicionada e proporcional ao contato entre a área de captação do dreno a as zonas mais resistivas nos resíduos, ou seja, quanto maior a zona resistiva em contato com o dreno, maior será a vazão de biogás em superfície (Figura 2.19).

Em levantamento detalhado por meio de 13 linhas de tomografia elétrica em área de influencia de 4 drenos de biogás, foram realizadas medidas de resistividade elétrica, processadas em modelos de inversão 2D e interpoladas lateralmente em modelos de visualização 3D, numa tentativa de avaliar a disposição tridimensional das zonas de alta resistividade e conexões com os drenos de biogás (Figura 2.20).

Os resultados demonstram a eficácia do método de Eletroresistividade na estimativa de zonas de acumulação de gases em aterros (Figura 2.21), além da possibilidade de monitoramento em sistemas de captação de biogás.

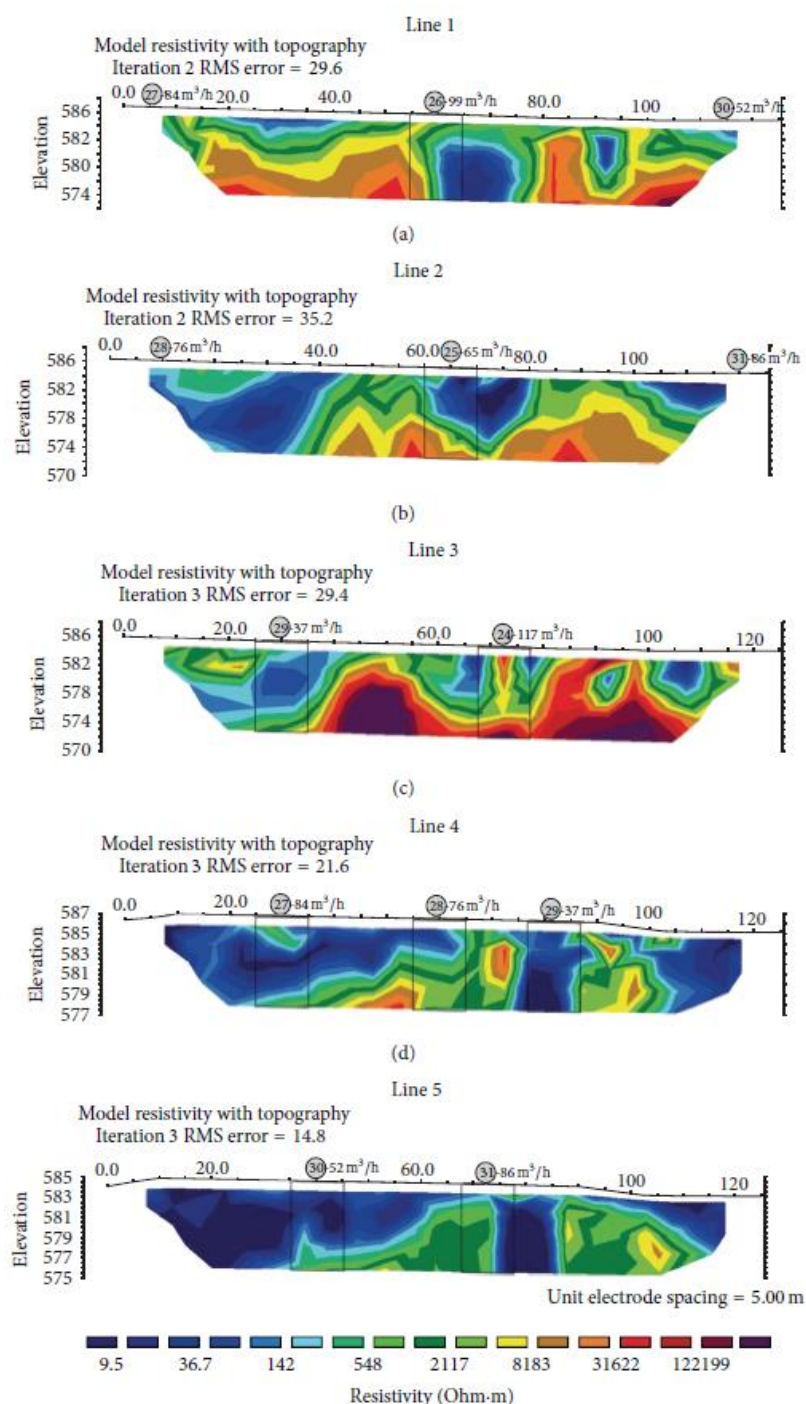


Figura 2.19 – Modelos de inversão de resistividade, com posição dos drenos de biogás e delimitação aproximada das áreas de influência de captação (Moreira *et al.* 2014b).

A análise comparativa entre vazões disponíveis e dados geofísicos possibilita a locação de novos pontos para perfuração e instalação de drenos de captação. Este procedimento pode auxiliar na otimização de processos de produção de energia provenientes da queima de biogás de aterros, além da possibilidade de detecção de áreas com potencial de ocorrência de emissões fugitivas.

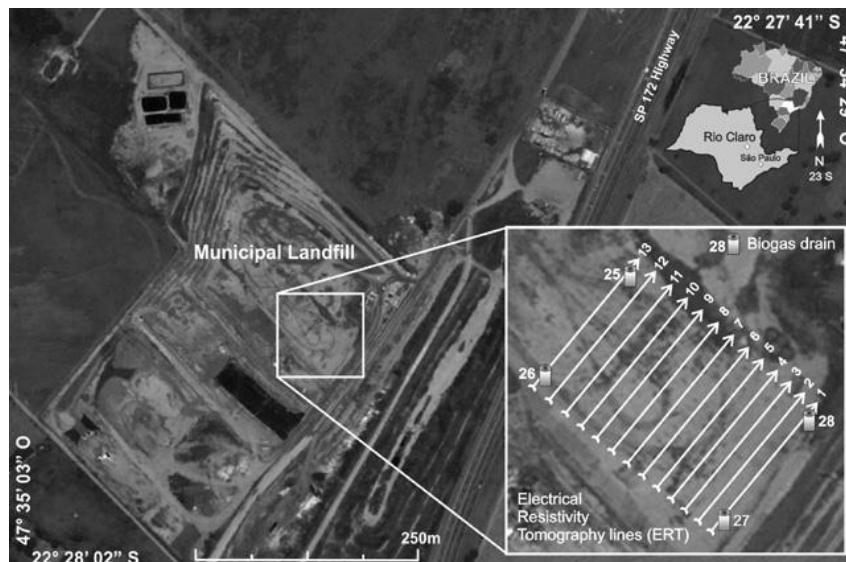


Figura 2.20 - Localização de linhas de tomografia elétrica em aterro sanitário entre área de influência de drenos de biogás (Moreira *et al.* 2015).

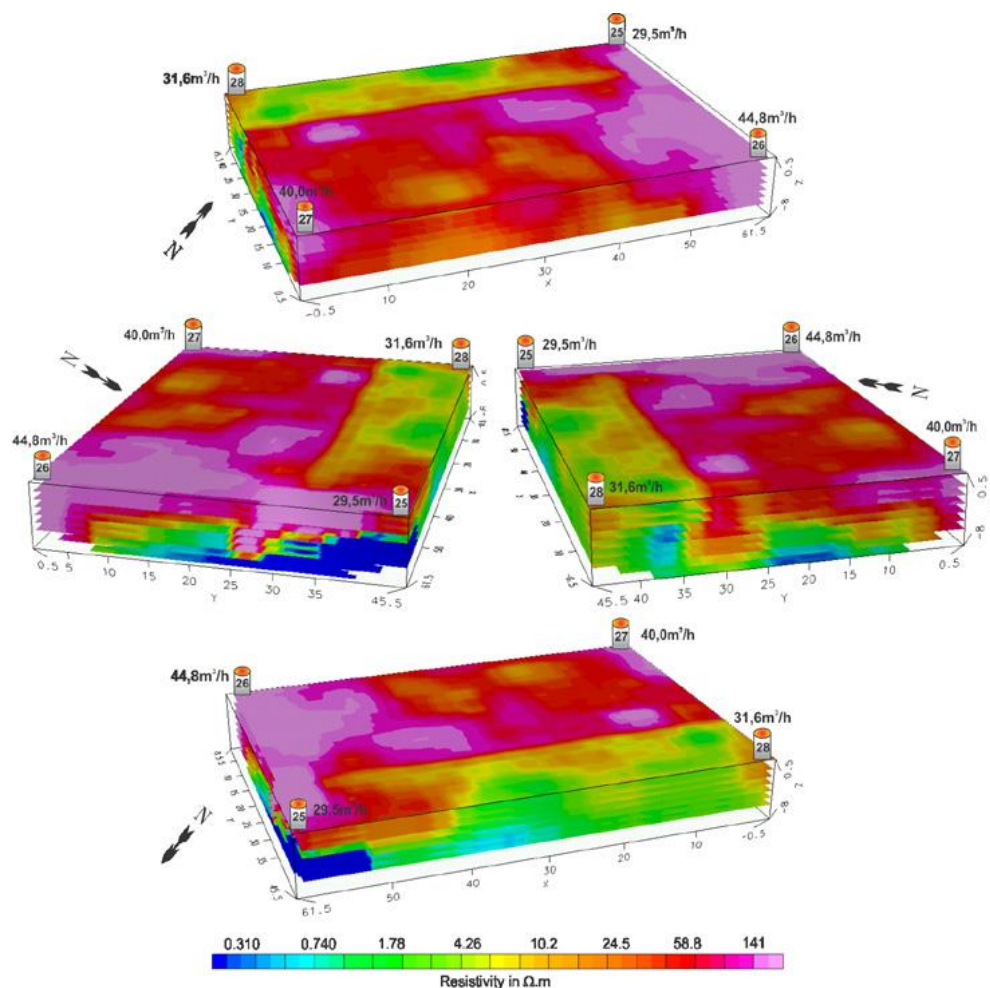


Figura 2.21 – Modelos de visualização 3D de resistividade elétrica, com drenos nos extremos da área e suas respectivas vazões de biogás (in m^3/h). (Moreira *et al.* 2015).

3 - Pesquisa Mineral

A diversidade de recursos minerais presentes possibilitou ao Brasil uma economia historicamente ligada à atividade mineira. A demanda crescente por commodities, presente tanto no mercado nacional como internacional, proporciona ao país o destaque de grande exportador de minério no cenário mundial. Neste contexto, o reconhecimento e a incorporação de novas reservas contribuem sobremaneira para o crescimento econômico, visto que a exportação de bens minerais possui alta relevância à manutenção do saldo positivo da balança comercial brasileira (MME, 2011).

Estudos de pesquisa mineral são importantes para a descoberta, qualificação e quantificação de novos depósitos para abertura de minas e durante a lavra do minério, para ampliação de reservas e aumento da vida útil do empreendimento. Depósitos minerais são descontínuos e raros no registro geológico e, para sua descoberta, é necessária uma pesquisa de longo prazo e que demanda altos investimentos.

Os procedimentos tradicionalmente utilizados na descoberta e caracterização de novas ocorrências minerais compreendem a amostragem de solo e rocha e ferramentas diretas como sondagem para análises químicas, além de ferramentas indiretas como os métodos geofísicos (Moon *et al.* 2006).

A maioria dos depósitos conhecidos no contexto brasileiro em particular, foi descoberta por meio de prospecção geoquímica e detalhamento geológico de superfície. A ação dos agentes de intemperismo em ambientes tropicais permite a dispersão de grande parte dos elementos químicos associados a acumulações minerais (Licht, 1998).

Contudo, a descoberta de depósitos de alta tonelagem e baixo volume é cada vez mais difícil por meio de investigação direta de superfície, além de descobertas crescentemente mais distantes dos centros urbanos, algo que encarece ou mesmo inviabiliza a lavra de depósitos eventualmente descobertos. As perspectivas atuais e futuras na prospecção e pesquisa mineral devem considerar depósitos profundos, ou seja, não susceptíveis a ação de processos intempéricos, onde a prospecção geoquímica convencional é ineficaz (Moon *et al.* 2006; Marjoribanks, 2010).

Este cenário é favorável ao uso crescente de métodos geofísicos como ferramenta fundamental em qualquer projeto de pesquisa mineral, sempre aliado e como guia para amostragem e quantificação analítica por geoquímica em amostras de solo, rocha e água (Lowrie, 2007; Dentith & Mudge, 2014).

3.1 – Trabalhos desenvolvidos na Bacia Sedimentar do Camaquã (regiões de São Sepé e Caçapava do Sul – RS)

Este autor iniciou suas pesquisas em geofísica de exploração mineral durante o período de docência junto a UNIPAMPA (2009-2011), na orientação de diversas iniciações científicas e monografias de conclusão de curso. A oportunidade de emprego no magistério superior na área de métodos Elétricos e Eletromagnéticos, possibilidade de retorno às atividades de pesquisa mineral, desenvolvidos durante atividades profissionais como geólogo de lavra e o exuberante contexto geológico e metalogenético na Bacia Sedimentar do Camaquã, foram os grandes motivadores para a finalização antecipada do Doutorado e desistência temporária de intercâmbio no exterior (Doutorado Sanduiche).

As diversas ocorrências minerais localizadas na Bacia do Camaquã, região sul do Brasil, apresentam grande potencialidade para fins de prospecção de metais básicos, além de contexto metalogenético e estrutural favorável diante de diversas minas de cobre e ouro descritas em âmbito regional. Neste contexto, foram realizados pelo autor diversos estudos geológicos e geofísico de detalhe em ocorrências minerais de cobre e ouro, por meio da aplicação dos métodos da Eletrorresistividade, Polarização Induzida e Magnetometria.

Os trabalhos iniciais consistiram na seleção de ocorrências minerais previamente descritas em levantamentos geológicos e geoquímicos regionais, cartografados no Programa de Levantamentos Geológicos Básicos (PLBG) – Folha Passo do Salsinho – escala 1:50.000, elaborado pela Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais (CPRM, 1995). Este produto reúne informações acerca do contexto estrutural, estratigráfico, evolução tectônica, metalogênese e de economia mineral nas regiões de Caçapava do Sul (RS), São Sepé (RS) e de grande parte da Bacia Sedimentar do Camaquã.

Posteriormente foram realizadas diversas campanhas de reconhecimento geológico local e levantamentos estruturais, que serviram de base para a seleção de áreas, com ênfase para autorização de acesso, logística de campo, modelos de mineralizações, paragênese mineral, contrastes de propriedades físicas possíveis, planejamento e programação de trabalhos de aquisição de dados geofísicos.

A prospecção geofísica foi iniciada na área por meio do estudo da ocorrência de cobre do Capão Grande, caracterizada por um afloramento de metarenito brechado, com

indícios de mineralização representados por impregnações de malaquita e azurita. A complexa trama estrutural descrita em afloramentos justificou a adoção de um arranjo de aquisição de dados adaptado de levantamentos geoquímicos realizados pelo autor durante trabalhos de pesquisa mineral na Serra da Borda Mineração e Metalurgia, que em certa medida, esta adaptação foi uma inovação para a área de métodos geofísicos.

Este estudo proporcionou a elaboração da monografia de conclusão de curso do Geofísico Lenon Melo Ilha e a publicação de 1 artigo científico.

Os trabalhos foram programados a partir de linhas de imageamento elétrico em arranjo Dipolo-dipolo e disposição azimutal de campo, com 6 linhas dispostas a cada 30° e seus centros coincidentes com a ocorrência mineral aflorante na área, com o objetivo de cobertura das varias direções estruturais reconhecidas (Figura 2.22).

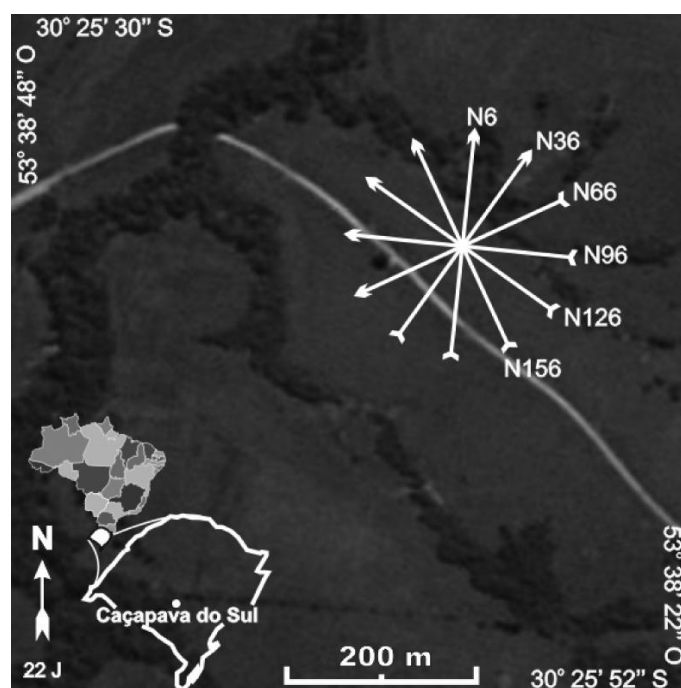


Figura 3.1 - Linhas de aquisição em disposição azimutal, com centro do arranjo posicionado sobre a ocorrência mineral do Capão Grande (Moreira & Ilha, 2011).

Os resultados geofísicos, de modo geral, apresentam valores baixos a intermediários, entre 80Ω.m e 1200Ω.m. As linhas N156°, N126° e N36° são caracterizadas pela presença de uma anomalia circular de baixa resistividade, em torno de 80Ω.m, localizada no centro das seções, posição de exposição em superfície da ocorrência mineral (Figura 2.23).

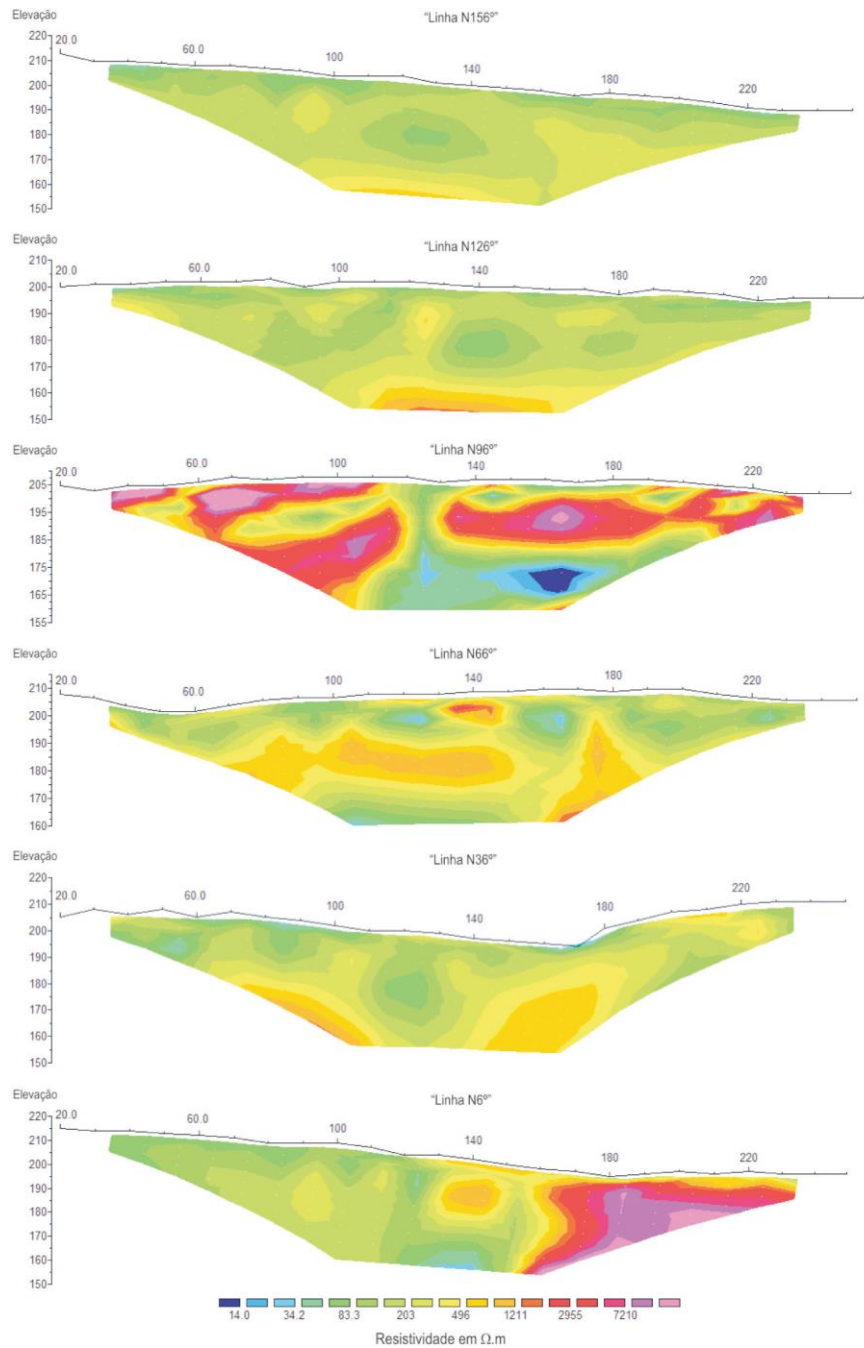


Figura 2.23 - Modelos de inversão das linhas de imageamento elétrico em disposição azimutal para a ocorrência do Capão Grande (Moreira & Ilha, 2011).

A integração das linhas em modelo 3D permite uma visualização adequada das zonas de baixa resistividade em superfície e em profundidade, com destaque para a maior intensidade dessa área em profundidade, quando comparada com o intervalo de superfície (Figura 2.24).

Os resultados foram satisfatórios para estimativa da arquitetura da ocorrência cuprífera, pois permite relacionar os resultados de modelamento com a ocorrência mineral aflorante e sua provável continuidade em profundidade, devido ao contraste nas propriedades físicas entre as rochas encaixantes e a zona mineralizada.

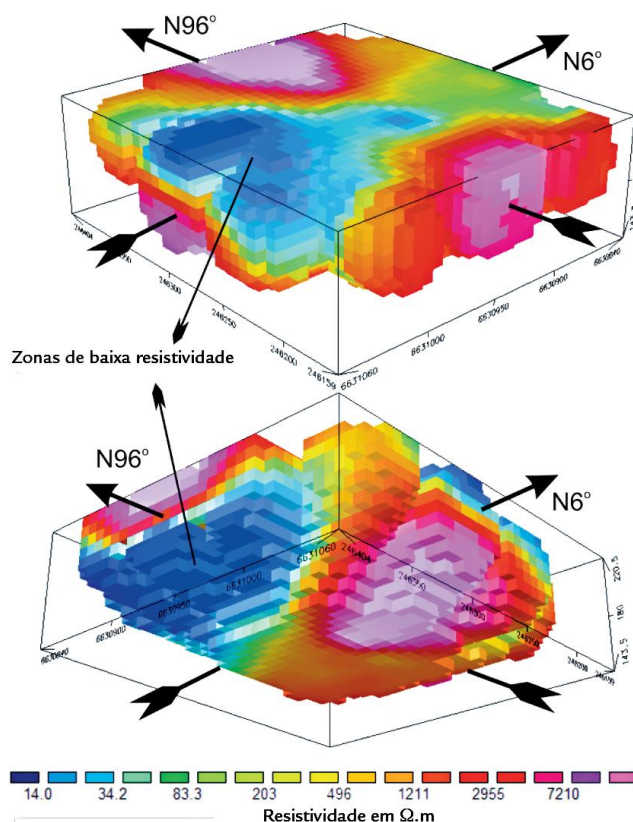


Figura 2.24 – Modelos de visualização 3D de resistividade elétrica para a ocorrência do Capão Grande Modelo 3D de resistividade (Moreira & Ilha, 2011).

Outra importante inovação para a área de métodos Geoeletricos foi à adaptação de técnicas de processamento usuais no modelamento de depósitos minerais por meio de dados químicos. A cubagem de depósitos minerais é uma forma de estimativa de reservas (teor e volume) em mineração, realizada por linhas de furo de sondagem programada para uma amostragem representativa do alvo mineralizado. As sondagens testemunhadas são georreferenciadas, amostradas e quimicamente analisadas, cujo produto permite a elaboração de banco de dados com posicionamento dos dados químicos para diversas profundidades (Moon *et al.* 2006). O modelamento 3D nestes casos consiste em interpolações ao longo das linhas de furo e interpolações entre linhas

de furo, sem quaisquer inversões de alta complexidade 3D disponíveis para dados geofísicos, desde que adotados malhas regulares de amostragem.

A adaptação deste procedimento para dados geoelétricos considera o produto numérico de inversão 2D dos dados de cada seção, reunidos em planilha única, com 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 ou cargabilidade (variável “R” ou “C”).

A resolução da malha de amostragem é condicionada ao espaçamento entre furos, entre linhas de furos e entre quantidade de amostras coletadas. De qualquer forma, o resultado analítico é tabelado e modelado em 2D e posteriormente interpolado em 3D. 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 relativo 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).

O uso de modelos de visualização 3D elaborados conforma a sistemática descrita é uma prática recorrente pelo autor a partir de 2011 e um dos primeiros registros na literatura nacional. Nesta época o autor orientou outras 2 monografias de conclusão de curso em ocorrências de cobre e ouro, com publicação de artigos científicos.

A ocorrência de cobre estudada neste caso foi a da Colônia Santa Bárbara, representada com impregnações de malaquita contidos num sistema de falhas de um *Hosrt* em rochas metavulcanossedimentares representadas por tufos vulcânicos. Os indícios de controle contexto estrutural da mineralização foram motivadores para adoção de linhas de imageamento elétrico em disposição azimutal (Figura 2.25), inversão 2D e interpolação 3D dos dados geoelétricos.

Particularidades acerca a elevada resistência de contato nesta área de estudos motivou o autor a adotar o arranjo Wenner-Schlumberger, caracterizado pela elevada razão sinal ruído e profundidade de investigação comparativamente maior, em relação ao tradicional arranjo Dipolo-dipolo, e um dos primeiros registros na literatura nacional do uso de arranjo de sondagem elétrica vertical em aquisições de imageamento elétrico.

Os resultados indicaram uma zona de alta cargabilidade e baixa resistividade sob uma área onde foram reconhecidas impregnações de malaquita em metarenito (Figura 2.26).

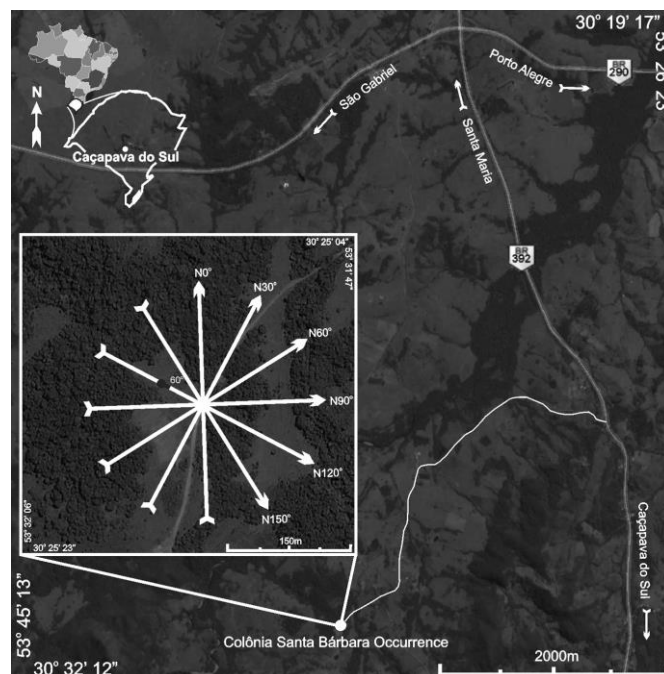


Figura 2.25 – Localização da ocorrência de cobre Colônia Santa Bárbara, com linhas de imageamento elétrico e furo de sondagem (Moreira *et al.* 2012a).

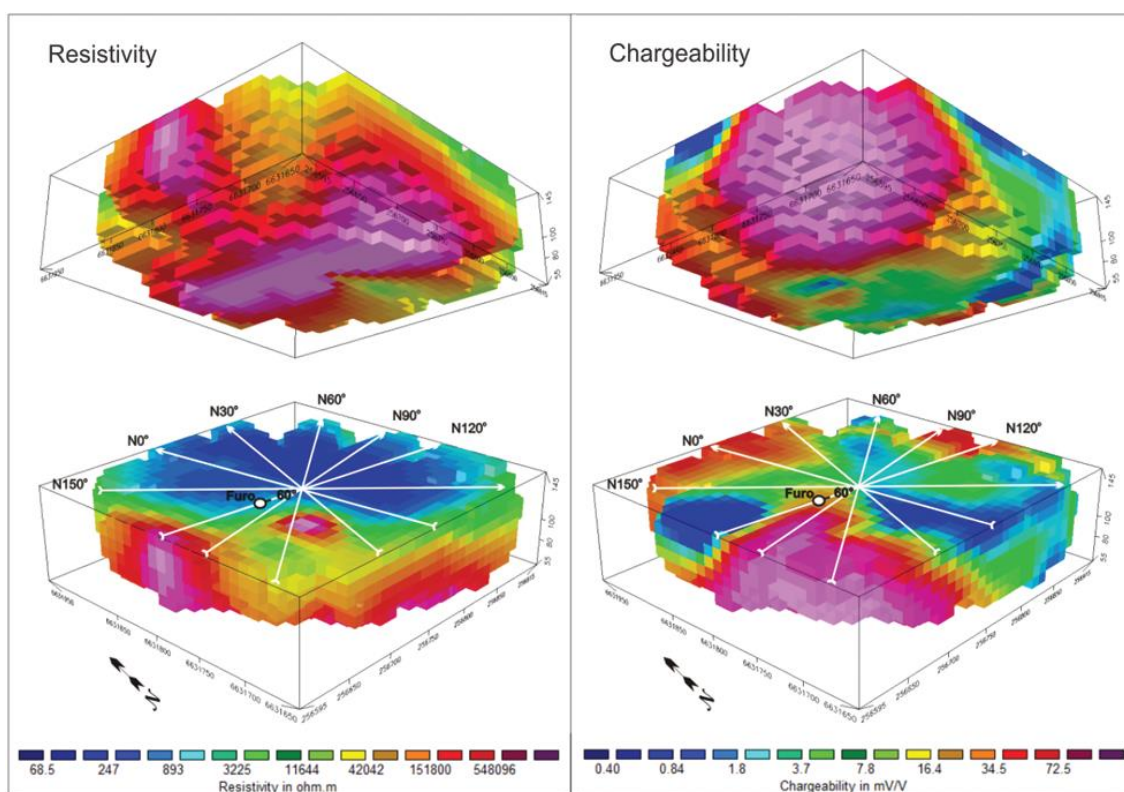


Figura 2.26 – Modelos de visualização 3D de resistividade (esquerda) e cargabilidade (direita), com visão no sentido N40°, posição de sondagem testemunhada disposição das linhas de imageamento elétrico em ocorrência de cobre (Moreira *et al.* 2012a).

Estudos acerca de anomalias geoquímicas baseadas em análise de sedimentos de corrente, disponibilizados no PLGB Passo do Salsinho, revelaram a existência de um padrão de pintas de ouro acima da média para a região do Cerrito do Ouro, município de São Sepé (RS), tradicionalmente conhecida por diversas ocorrências de ouro alojadas em xistos do Complexo Metamórfico Vacacaí.

Esta anomalia geoquímica é representada por 42 pintas de ouro em bateamento de sedimentos de corrente, diante de uma média em 3 a 4 pintas de ouro para o restante da área, com ponto de amostragem representado por drenagem formada pela confluência de duas nascentes, das quais uma é originada numa intrusiva denominada gabro Santa Catarina (CPRM, 1995). Estudos petrográficos preliminares revelam uma assembleia mineral típica de um gabro, ausente que quaisquer indícios de sulfetação ou indícios de hidrotermalismo em sua matriz.

Diante da possibilidade de mineralizações auríferas filonianas em sistemas de fraturas na intrusiva, foram realizadas 3 linhas de imageamento elétrico em disposição azimutal, com o objetivo de cobertura das principais famílias de fratura (Figura 2.27).

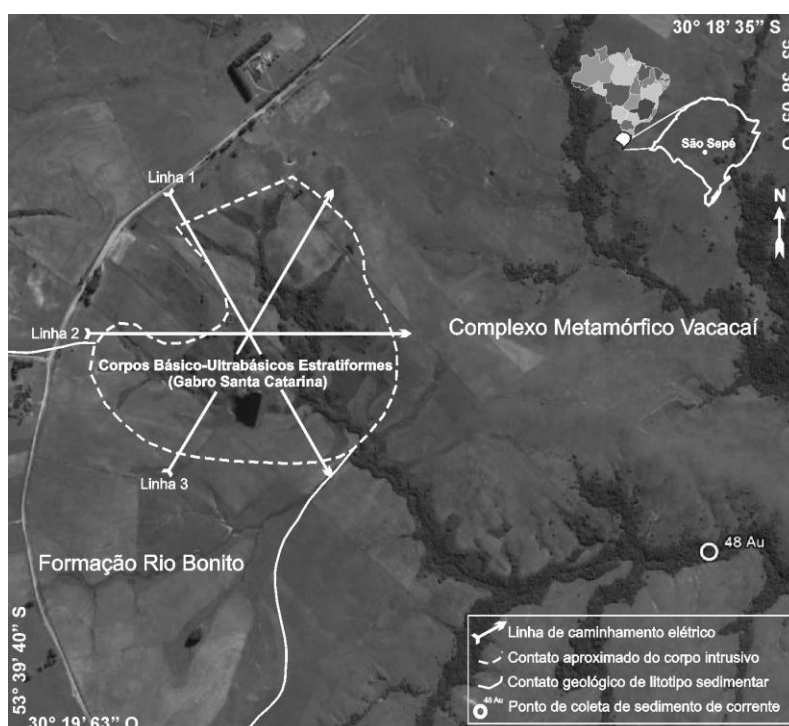


Figura 2.27 – Limites do gabro Santa Catarina e demais unidades geológicas, com ponto de amostragem de sedimento de corrente e linhas de imageamento (Moreira *et al.* 2014).

As associações de baixa resistividade e alta cargabilidade permitiram caracterizar áreas com provável concentração de sulfetos (Figura 2.28).

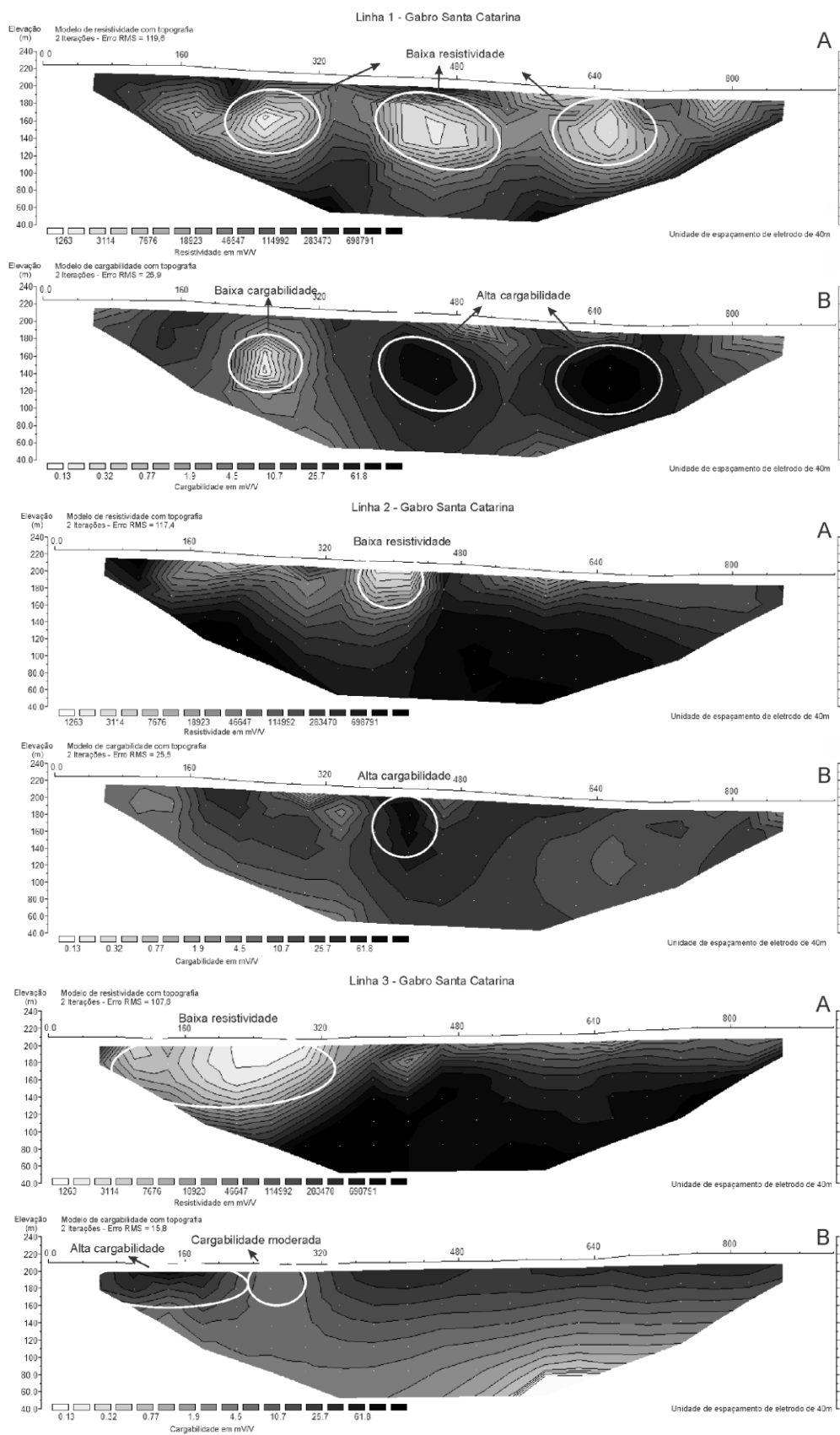


Figura 2.28 - Modelos de inversão de resistividade e cargaabilidade para a área do gabro Santa Catarina, com realce de áreas com provável mineralização (Moreira *et al.* 2014).

Com base no arcabouço estrutural da área e no litotipo hospedeiro, as mineralizações devem estar contidas em veios ou filões em fraturas. É provável que haja relação entre pintas de ouro encontradas em sedimentos de corrente, coletados em drenagem nascente no gabro e áreas de baixa resistividade/alta cargabilidade.

A continuidade dos estudos na Bacia do Camaquã como docente na UNESP foi financiado por projeto intitulado “Pesquisa *“Aquisição e integração de dados geofísicos e geoquímicos em pesquisa de ocorrências minerais na bacia sedimentar do Camaquã (RS)”* aprovado no edital Universal CNPq – 2013 (processo nº 470821/2013-2), que proporcionou a realização de trabalhos de campo.

Outro trabalho realizado na região envolveu um estudo geofísico e geológico na ocorrência de cobre Vitor Teixeira (Figura 2.29), com impregnações de malaquita em blocos e veios de quartzo leitoso com óxidos de ferro e cavidades de sulfetos oxidados, num contato entre sedimentos da Bacia do Camaquã e xistos do embasamento. Este estudo resultou na dissertação de mestrado intitulada *“Integração de dados geofísicos e estruturais no estudo de ocorrência de cobre localizada na região norte da bacia sedimentar do Camaquã (RS)”* elaborada pelo Geólogo Henrique Pelorca Carneiro.

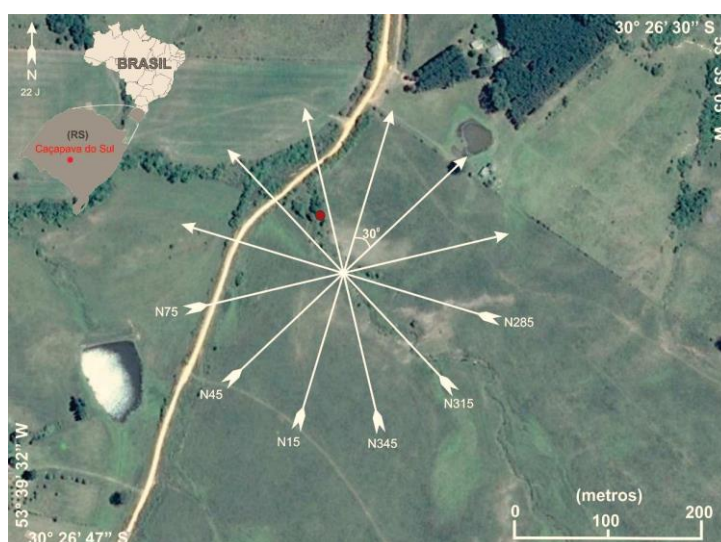


Figura 2.29 – Ocorrência de cobre Vitor Teixeira, com disposição das linhas de tomografia elétrica (Carneiro, 2016).

Análises estruturais preliminares relevaram um complexo sistema de fraturas e falhas, que embasaram a realização de linhas de tomografia elétrica em arranjo Wenner-Schlumberger com disposição azimutal. Os resultados permitiram a definição de zonas potencialmente mineralizadas, com alta resistividade e alta cargabilidade, difusas até

30m de profundidade (sedimento e rocha alterada) e fortemente orientadas abaixo desta profundidade (predomínio de veios e filões no embasamento) (Figuras 2.30 e 2.31).

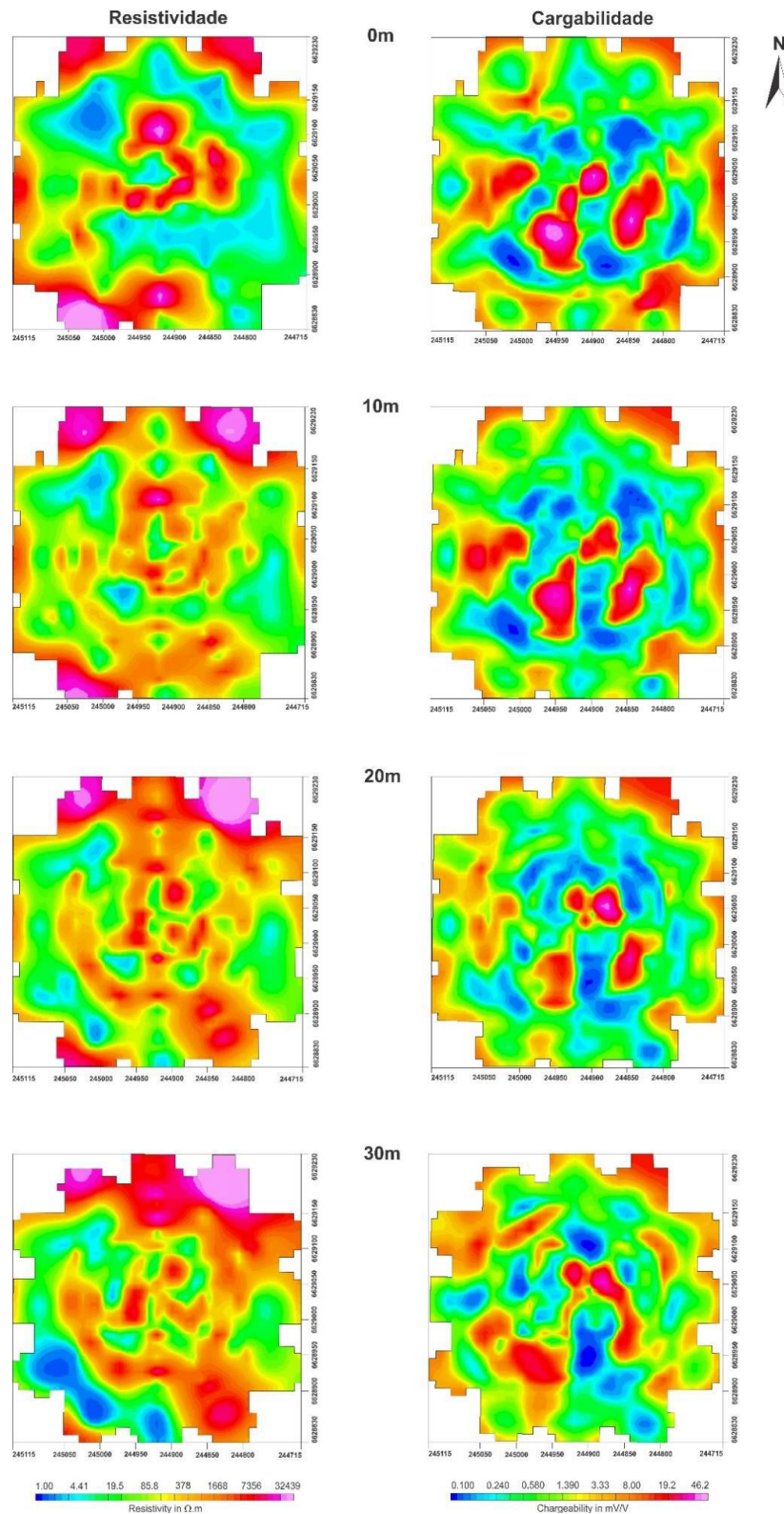


Figura 2.30 – Mapas de resistividade e cargabilidade para até 30m de profundidade, com ocorrência de cobre no centro dos mapas (Carneiro, 2016).

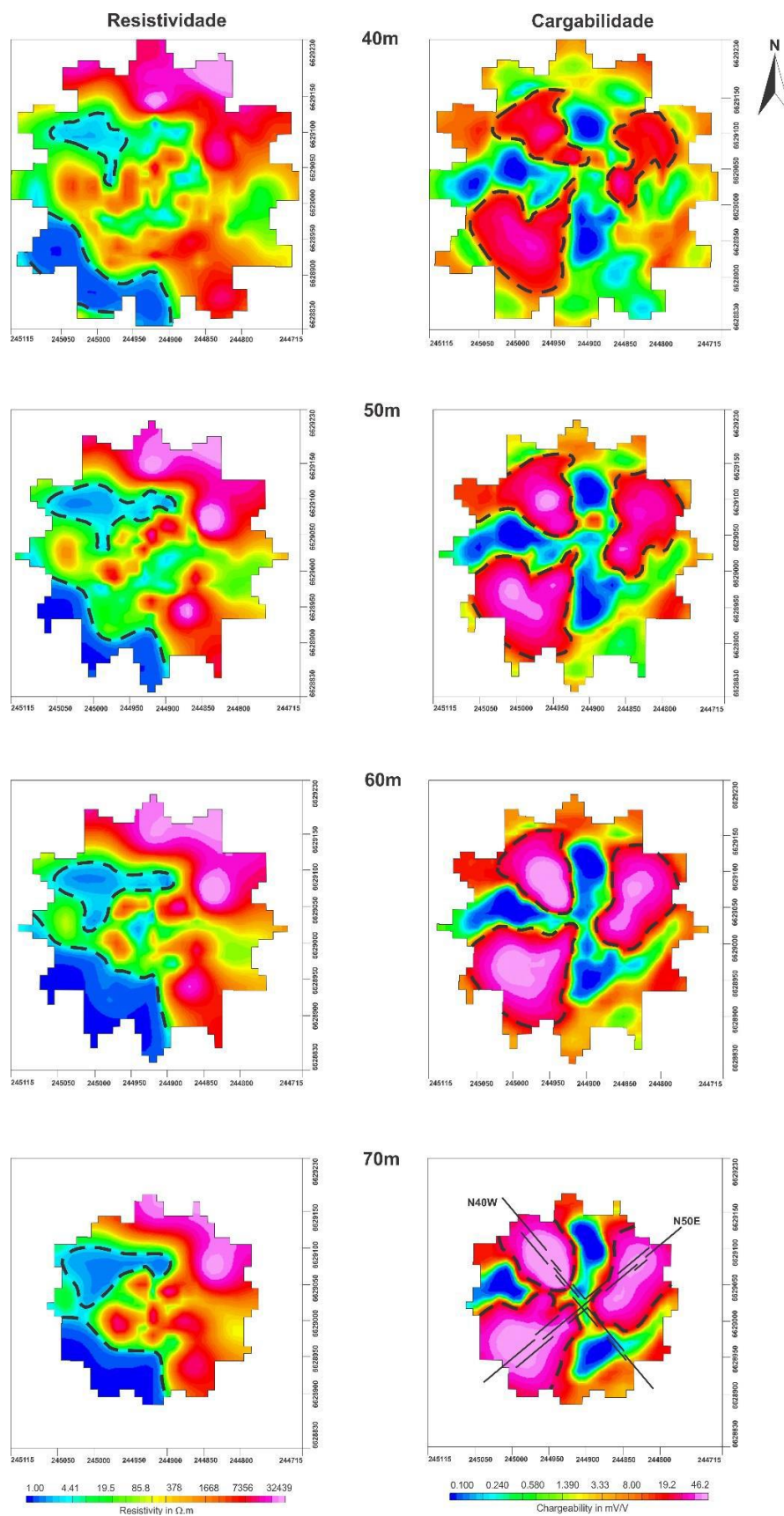


Figura 2.31 – Mapas de resistividade e cargabilidade entre 40m e 70m de profundidade, com ocorrência de cobre no centro dos mapas (Carneiro, 2016).

Em trabalho desenvolvido num dos extremos de uma mina de ouro desativada no município de São Sepé (RS), foram realizados estudos geofísicos por meio dos métodos da Eletrorresistividade e da Polarização Induzida na avaliação da continuidade de um filão de quartzo mineralizado em ouro (cerca de 20g/t) (Figura 2.32). Este trabalho resultou na monografia de Especialização da geofísica Karollina Borssato.



Figura 2.32 – Localização da ocorrência na mina do Cerrito do Ouro, com disposição das linhas de tomografia elétrica (Moreira *et al.* 2016).

A integração de dados diretos e indiretos proporcionou um detalhamento efetivo da ocorrência mineral. O arranjo Wenner-Schlumberger resultou em dados satisfatórios, cuja integração em modelos de visualização 3D possibilitou a definição de uma área potencialmente mineralizada e desconhecida, diante do posicionamento equivocado dos furos de sondagem no limite externo do alvo (Figura 2.33).

O potencial de detalhamento de depósitos minerais, rapidez e versatilidade na aquisição combinada por meio da Eletrorresistividade e da Polarização Induzida por equipamentos tomográficos, são incentivos ao uso da geofísica no planejamento e atividades de lavra, para definição de zonas mineralizadas em frentes de lavra ou em trabalhos de ampliação de reserva nos limites de depósitos previamente reconhecidos, complementados por amostragem e quantificação de teores.

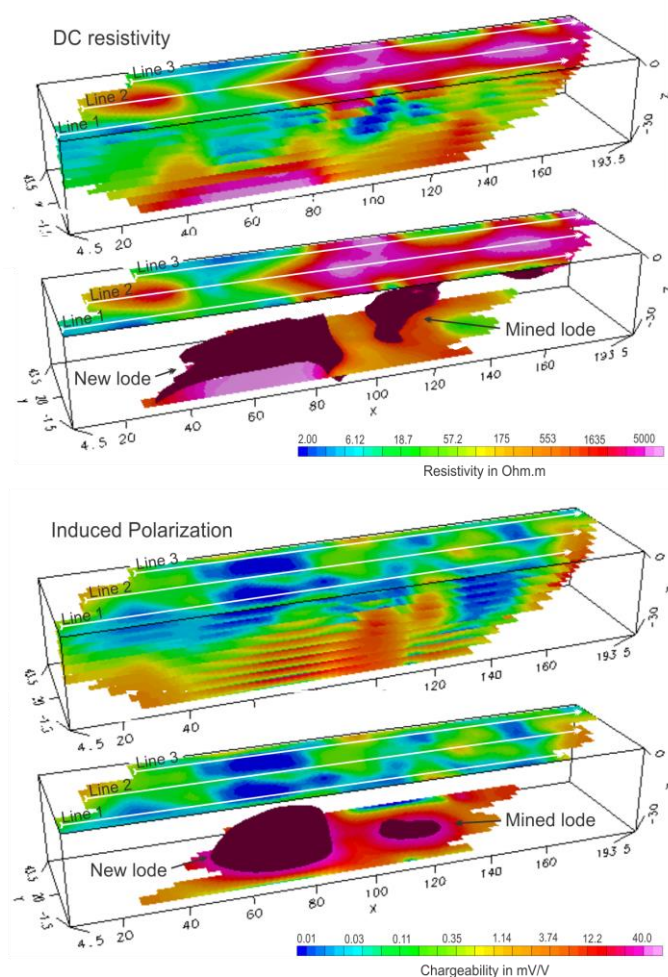


Figura 2.33 – Modelos de visualização 3D de resistividade e cargabilidade, com ajuste de isosuperfície de $2500\Omega.m$ e $30mV/V$ (Moreira *et al.* 2016).

Numa tentativa de reavaliação de métodos e procedimentos de trabalho, aliado a um levantamento estrutural e estratigráfico de detalhe, foi realizado um novo estudo na ocorrência de cobre do Capão Grande, que resultou na dissertação de mestrado intitulada “*Integração de dados geofísicos e geológicos na caracterização morfológica de ocorrência de cobre na borda norte da bacia do Camaquã (RS)*” elaborado pela Geóloga Ariane Pinheiro Côrtez, com publicação de artigo científico.

A aquisição de linha de tomografia elétrica em arranjo Wenner-Schlumberger mais longas em relação ao estudo anterior, dispostas em malha regular (Figura 2.34) e uma ampla revisão dos modelos de depósito atualmente aceitos no âmbito da Bacia Sedimentar do Camaquã, proporcionou a elaboração de um modelamento 3D da arquitetura da ocorrência mineral por aplicação dos métodos da Eletroresistividade e da Polarização Induzida, correlacionável com os principais elementos estruturais do modelo metalogenético magmático hidrotermal (Figura 2.35).

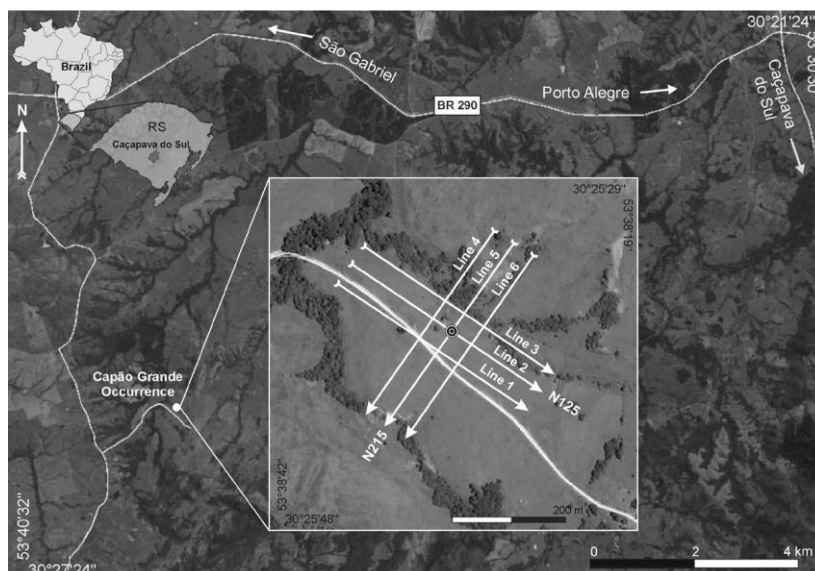


Figura 2.34 – Localização da ocorrência de cobre do Capão Grande, com disposição das linhas de tomografia elétrica (Côrtez *et al.* 2016).

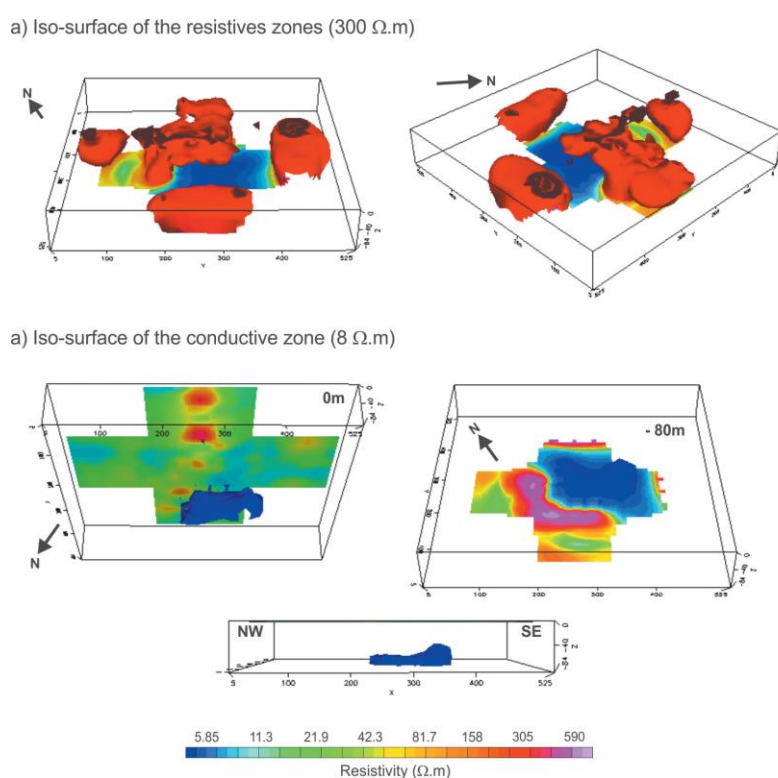


Figura 2.35 – Modelos de isosuperfície 3D de alta resistividade (silicificação) e de baixa resistividade (sulfetação) (Côrtez *et al.* 2016).

A análise estrutural indicou vários eventos de deformação, com provável ascensão de fluídos hidrotermais, seguido por cimentação e disseminação de sulfetos no metarenito. Os indícios de carbonatação e silicificação em superfície com áreas de baixa resistividade e alta cargabilidade foram reunidos num modelo (Figura 2.36).

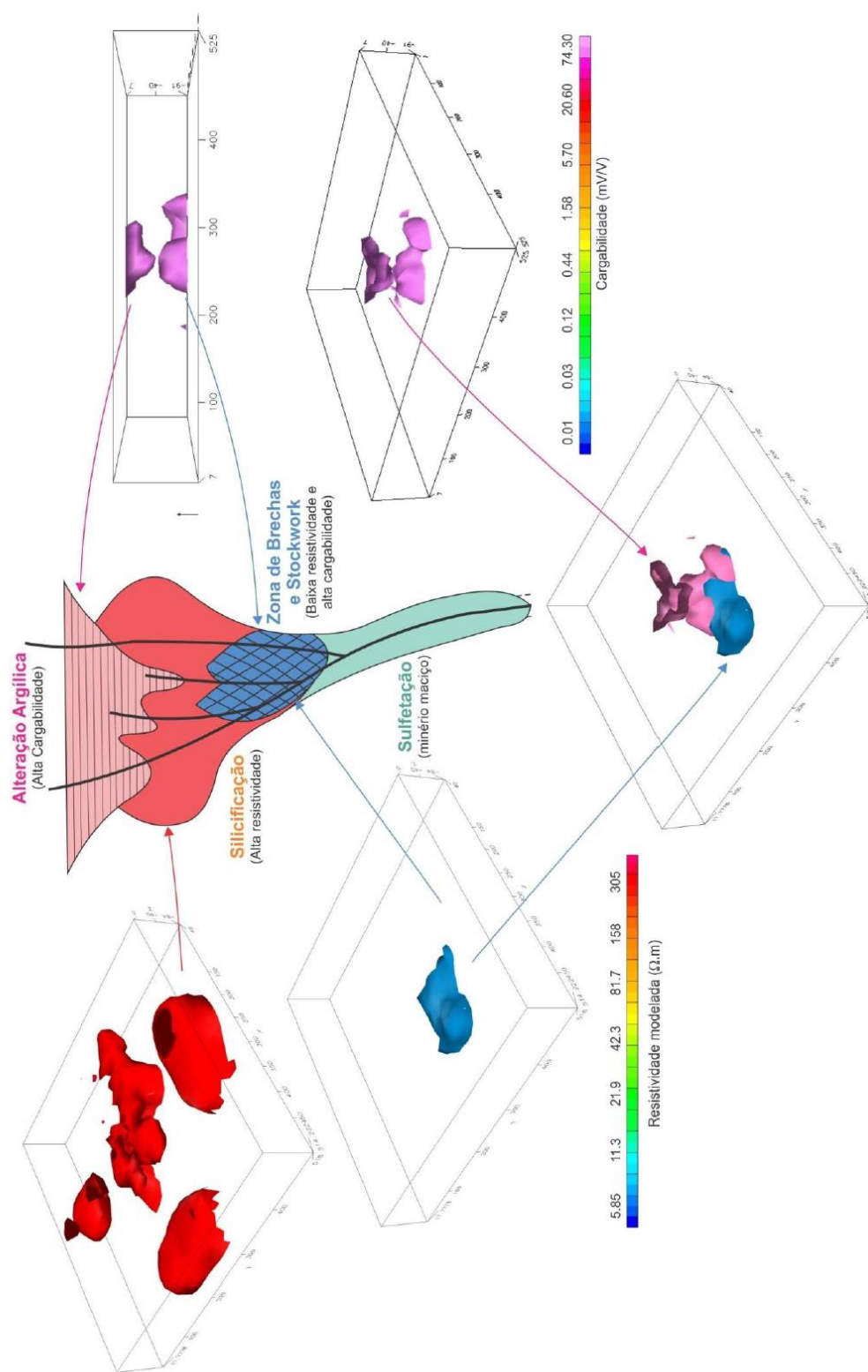


Figura 2.36 - Modelo de depósito epitermal de baixa sulfetação e zonas de alteração hidrotermais (Modificado de PIRAJNO, 1992) correlacionadas com os modelos 3D de resistividade e cargabilidade. (Côrtez, 2015)

3.2 – Trabalhos desenvolvidos no Complexo Amparo e Grupo Itapira (Itapira – SP) e Complexo Silvianópolis (Natércia e Heliodora – MG)

As atividades de pesquisa na região de Itapira (SP) foram iniciadas logo após o ingresso como docente na UNESP, em continuidade aos trabalhos de pesquisa mineral, desenvolvidos durante a docência na UNIPAMPA.

No Complexo Amparo e no Grupo Itapira foram cartografadas dezenas de ocorrência manganês de origem residual e supergênica, ambas caracterizadas por camadas de manganês laterítico em superfície. O minério de origem residual provém de mineralizações singenéticas a sedimentação de fundo marinho das unidades de origem sedimentar, associado às zonas mais profundas e redutoras deste ambiente. O minério de origem supergênica é derivado da ação intempérica em granada (espessartita) gnaisses, cuja destruição possibilita a liberação de manganês e sua recombinação sob a forma de impregnações de óxidos e hidróxidos em interfaces óxido/redutores no solo.

Os trabalhos de uso de métodos geofísicos foram iniciados pela ocorrência da Mina do Cocho, ocorrência localizada a nordeste da cidade de Itapira (SP) (Figura 2.37), lavrada por meio de escavação de solo e saprolito, onde foram selecionadas frentes de lavra claramente mineralizadas, para calibração inicial dos dados e definição de assinatura geoeletrica das zonas mineralizadas (Figura 2.38).

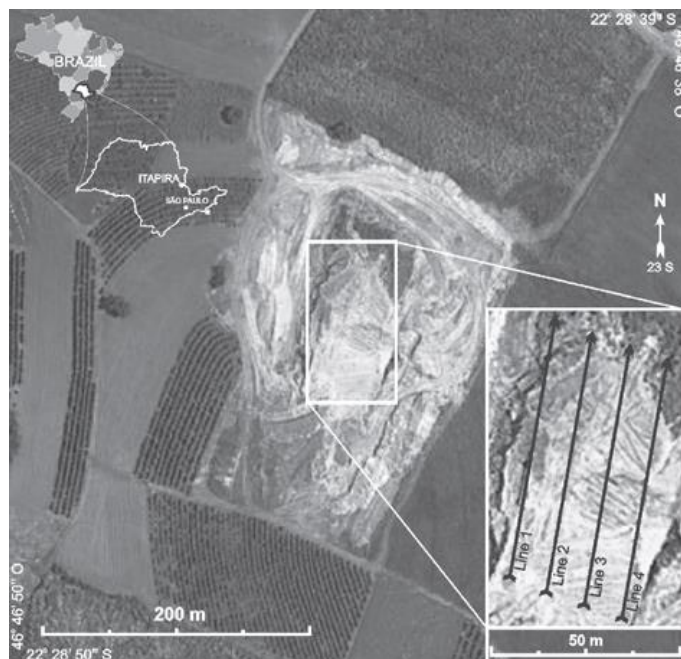


Figura 2.37 – Mina do Cocho (manganês) em Itapira (SP), com disposição das linhas de imageamento elétrico (Moreira *et al.* 2012).

Os resultados e desafios enfrentados neste trabalho estimularam a elaboração de um projeto para a FAPESP, inclusive para atendimento de demandas do laboratório de Geofísica (DGA-IGCE-UNESP). Em 11/2013 foi aprovado o projeto intitulado “*Prospecção geofísica em ocorrência de manganês supergênico na região de Natércia, Sul de Minas Gerais*”, (processo nº 2013/09291-5). Este projeto proporcionou a incorporação do laboratório de Geofísica de um resistivímetro Terrameter LS de 84 canais, 250W e 2,5A máximos, que permite a realização de ensaios tomográficos 2D e 3D, além de perfilagem de poços, por aplicação dos métodos da Eletorresistividade, Polarização Induzida e Potencial Espontâneo. Os diversos trabalhos do autor que fazem referência à tomografia elétrica foram realizados com este equipamento.

A proposta científica deste projeto foi à análise da sensibilidade dos métodos geoeletricos no modelamento de ocorrências minerais de manganês, originados do intemperismo de gonditos (depósitos residuais) e da destruição de espessartitas (depósitos supergênicos), por aplicação dos métodos da Eletorresistividade e da Polarização Induzida. A quase ausência de estudos deste tipo na literatura, importância na fabricação de aços e o grande potencial de gênese em ambiente tropical, foram os principais motivos para realização do projeto.

O predomínio de depósitos de pequeno volume em muitos casos inviabiliza trabalhos de pesquisa mineral inicialmente por métodos diretos. Levantamentos preliminares a partir de métodos geofísicos são potencialmente aplicáveis em estimativas de volume e como guia prospectivo para amostragens diretas, quantificação de ocorrências minerais, estimativas de reserva e análise da viabilidade econômica.

Inicialmente foram realizadas diversas campanhas de reconhecimento geológico em afloramentos na região de Heliadora e Natércia, sul de Minas Gerais, onde foram cartografadas algumas poucas ocorrências de manganês publicadas no PLGB Folha Heliadora escala 1:50.000. Este trabalho de campo proporcionou a descoberta de cerca de 20 ocorrências, das quais foram selecionadas duas para desenvolvimento do projeto. Em muitos casos, foi possível verificar granada xistos em avançado estado de intemperismo, com destruição dos silicatos e neoformação em solo sob a forma de impregnações de óxidos de manganês (Figura 2.40).

Os trabalhos geofísicos consistiram em linhas de tomografia elétrica para leituras de resistividade elétrica e cargabilidade, dispostas de forma paralela ao sentido de fluxo da água subterrânea e a corte de solo descrito em estrada de terra (Figura 2.41).

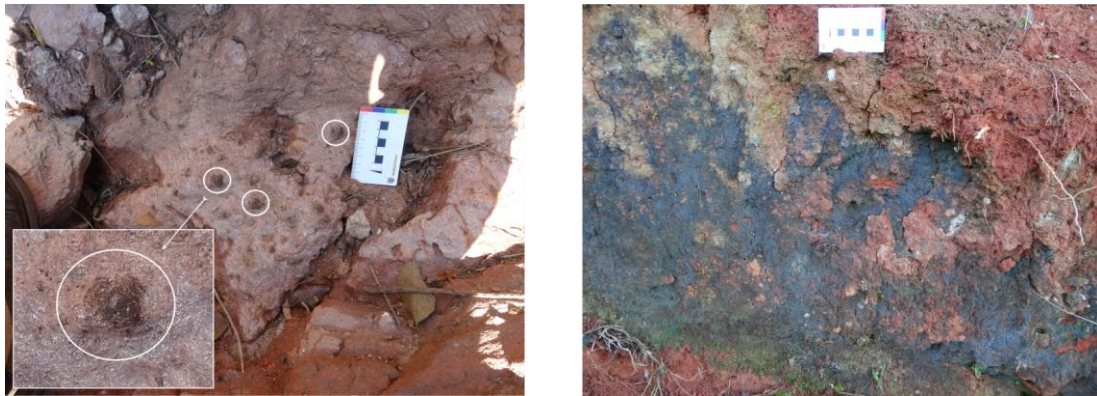


Figura 2.40 – Reconhecimento geológico de campo. A) Granada muscovita xisto com realce para cristais de espessartita (Mn), verificados próximos de uma das ocorrências minerais estudadas. B) Impregnações de óxidos de manganês em perfil de solo sobreposto (Moreira *et al.* no prelo).

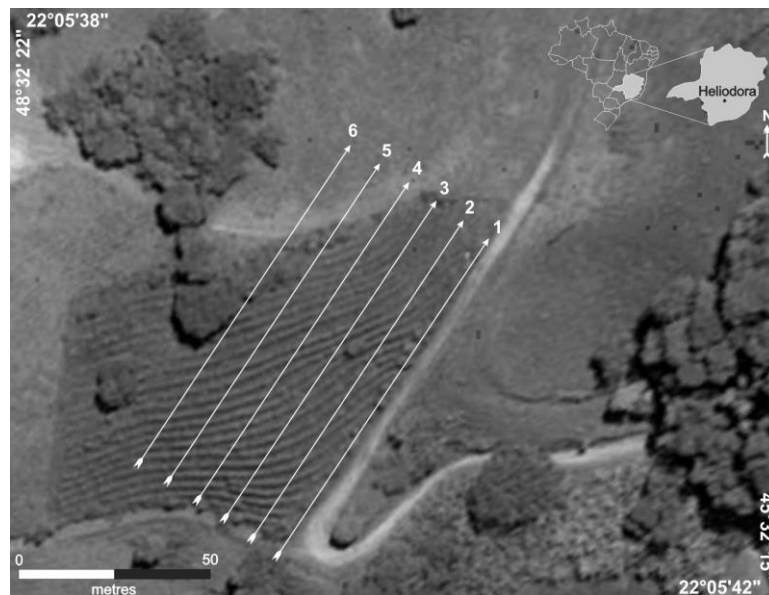


Figura 2.41 – Ocorrência de manganês supergênico na região de Heliódora (MG), com posicionamento das linhas de tomografia elétrica (Moreira *et al.* no prelo).

A integração dos parâmetros físicos medidos das linhas mais próximas a área mineralizada aflorante permite definir uma assinatura de baixa resistividade e baixa cargabilidade para a zona central e de baixa cargabilidade para áreas periféricas mais disseminadas (Figura 2.42). A integração do conjunto de seções de resistividade elétrica e cargabilidade em modelos de visualização 3D proporcionam uma análise em profundidade no terreno e a eventual continuidade da mineralização (Figura 2.42).

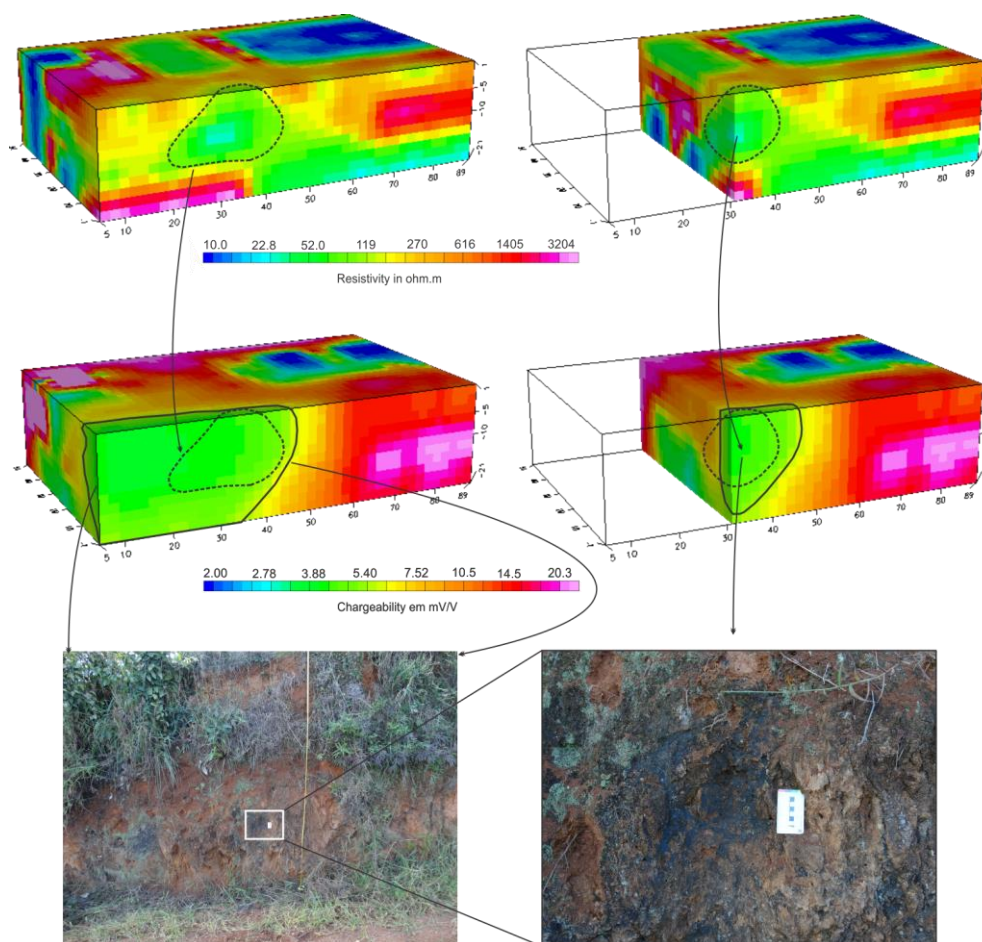


Figura 2.42 – Modelos de visualização 3D de resistividade e cargabilidade, com realce de áreas correlacionáveis a ocorrência mineral aflorante (Moreira *et al.* no prelo).

A caracterização de uma zona mineralizada lateralmente extensa e restrita em profundidade é resultante do intemperismo, que modifica e redistribui o conteúdo mineral nos diferentes níveis do depósito, originando novos zoneamentos de elementos e teores dentro do perfil de alteração, tanto vertical como horizontalmente. Este mecanismo pode proporcionar a economicidade de uma série de acumulações supergênicas em ferro, níquel e manganês, pela lixiviação de componentes acessórios e indesejáveis (Borchert, 1970; Roy, 1992; Valetton, 1994; Roy, 1997; Maynard, 2003).

A lixiviação e o transporte do manganês são governados por processos e mecanismos similares aos que governam o ferro, ou seja, a maioria dos compostos de manganês é solubilizada em águas neutras a ácidas e precipitada em águas alcalinas. O manganês lixiviado das rochas é carregado do perfil de solo vertical e lateralmente e em seguida transportado como compostos carbonatados ou partículas por águas naturais de pH levemente ácido até os corpos d'água (Frakes & Bolton, 1992).

Crostras oxidadas podem gerar horizontes endurecidos e posicionados em níveis profundos de solos ferralíticos, resultantes da migração de soluções manganésíferas/ferruginosas provenientes de porções superiores e bastante drenadas. As soluções migram verticalmente no perfil e carregam o manganês, com solubilidade bastante superior em comparação ao ferro, até a deposição geralmente entre os horizontes B e C (saprolítico) (Evangelou, 1998, Hillel *et al.* 2004). Tais acumulações podem atingir concentrações de até 80% em óxidos de manganês, essencialmente constituídos por psilomelana e pirolusita (Taylor, 2011).

Neste sentido, a concentração de óxidos de manganês no perfil de solo estudado e sua ocorrência restrita a poucos metros de profundidade, podem estar relacionadas migração lateral de soluções enriquecidas em manganês entre os horizontes B e C e a precipitação de metais numa frente de redução-oxidação, coincidente com interface de exposição de solo, onde ocorre evapotranspiração, aeração e formação de óxidos, conforme McKenzie (1972), Loganathan & Bureau (1973), Gadde & Laitinen (1974), Hem (1978), Stone & Morgan (1984), Hem *et al.* (1985), Junta & Hochella (1994).

De forma paralela, foram desenvolvidos trabalhos na ocorrência São Roque (manganês residual) na região de Itapira (SP). Este estudo contou como mapeamento inicial de manganês laterítico e programação de linhas de tomografia elétrica para reconhecimento da arquitetura (dimensões) do depósito primário sotoposto. Este trabalho possibilitou a elaboração da dissertação de mestrado intitulada “*Caracterização morfológica de ocorrência de manganês por meio de dados geofísicos*” pelo Geólogo Leandro Balarin Vieira, com publicação de artigo científico.

Dados químicos descritos para as mineralizações de manganês da região de Itapira revelam variações entre 5% a 10% de grafita, possivelmente oriunda da matéria orgânica sedimentada durante a precipitação química do manganês em zonas altamente redutoras em fundo marinho (Veríssimo 1991; Angeli *et al.* 2011). A tectônica policíclica recorrente nesta região resultou em gonglitos metamorfizados e deformados, aparentemente associados a cristas de dobramentos regionais.

Neste sentido, os trabalhos geofísicos na área consistiram na realização de uma sequência de linhas de tomografia elétrica para leituras de resistividade e cargabilidade, programadas sobre a cobertura laterítica da ocorrência São Roque e orientadas de forma perpendicular a orientação geral da charneira de um dobramento regional (Figura 2.43).

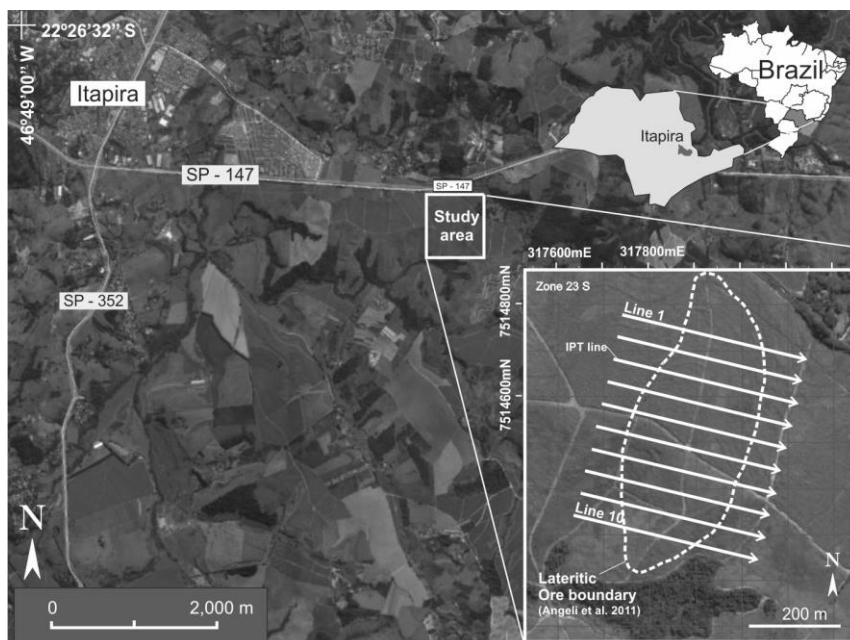


Figura 2.43 – Localização da ocorrência na São Roque, com limites de superfície de manganês laterítico e linhas de tomografia elétrica (Vieira *et al.* 2016).

Os resultados geraram modelos de inversão 2D e reunidos em modelos de visualização 3D. A análise dos modelos revelam zonas de alta cargabilidade com mergulho de 40° para NW, condizentes com estruturação local (Figura 2.44).

A análise do modelamento 3D revela que a mineralização primária está contida neste flanco NW de dobramento e que sua expressão em superfície (intemperismo e rebaixamento da crista da dobra), proporcionou a geração da superfície laterítica. O minério gondítico é restrita ao centro da superfície laterítica e possui área de abrangência bastante inferior a laterita (Figura 2.44). Este entendimento confronta hipóteses aventadas para a área, que sugeriam a existência de corpos gondíticos de arquitetura filoniana contidos em cristas de dobras (Artur 1980, Veríssimo 1991). Trabalhos de avaliação de reservas na região consideraram este modelo e, por coincidência, resultaram em prospectos não econômicos (Angeli *et al.* 2011).

A análise comparativa entre as áreas de estudos indica que, embora sejam ocorrências de manganês, a gênese dos depósitos é completamente distinta e a assembleia mineral é um fator determinante no contraste de propriedades físicas. O predomínio de óxidos em hidróxidos na ocorrência de manganês supergênico possibilitou uma caracterização parcial por medidas de resistividade e cargabilidade devido a contraste sutis e difusos. Para o caso da ocorrência de manganês residual, a

presença de grafita na assembleia mineral foi determinante na caracterização da morfologia do depósito, com claro contraste em relação a encaixante devido a elevada polarizabilidade da grafita em relação aos silicatos.

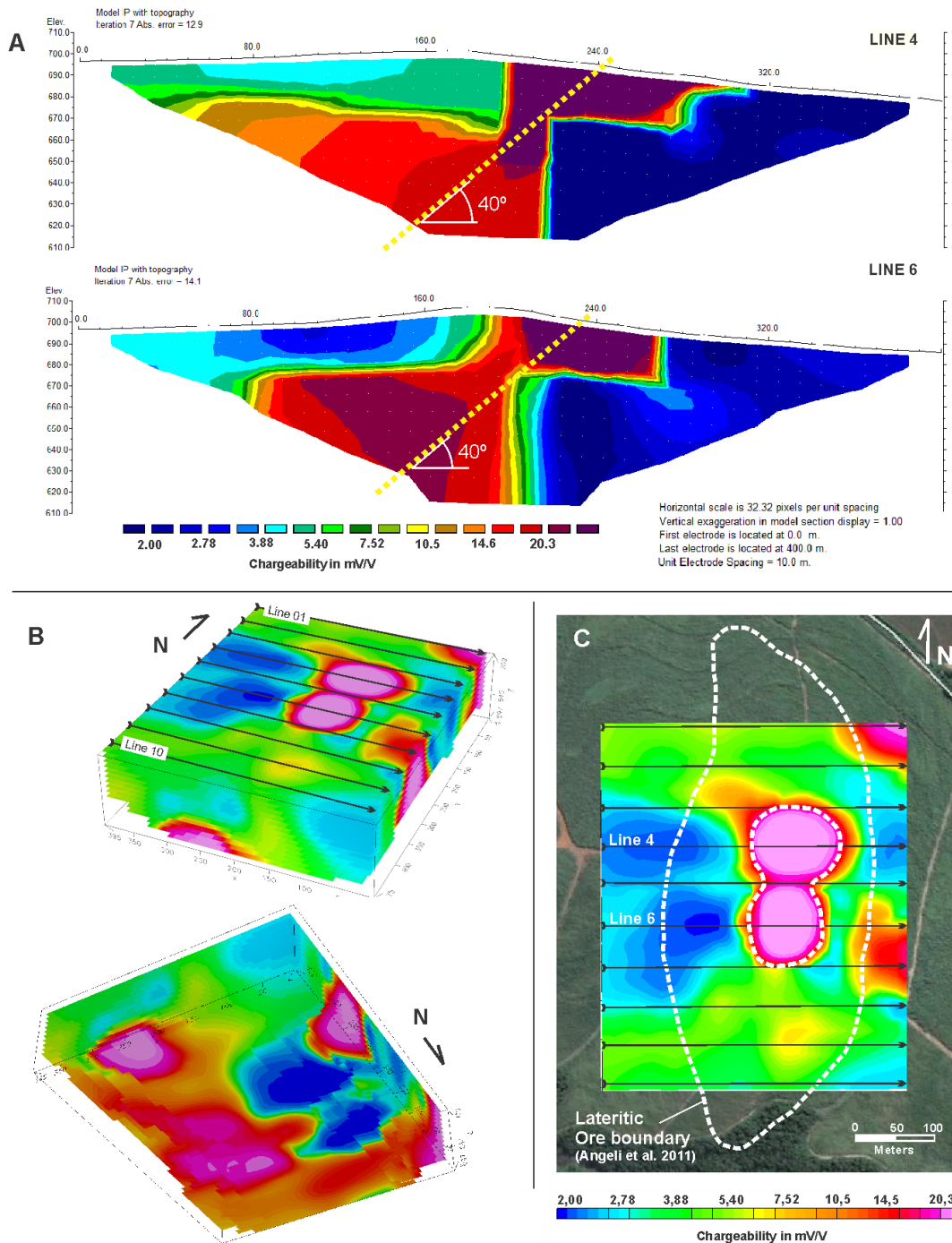


Figura 2.44 – Integração de resultados geofísicos e geológicos para a área da ocorrência São Roque. A) Modelos de inversão de cargabilidade mais representativos. B) Modelos de visualização 3D com linhas de tomográfica elétrica. C) Limites entre superfície laterítica e mineralização primária estimada na região central (Vieira *et al.* 2016).

4 – Estudos Geotécnicos

4. 1 - Estudos em aterro sanitário

A disposição incorreta ou o manuseio indevido de resíduos sólidos geram sérios problemas ao homem e ao ambiente, principalmente se ocorrerem de maneira inadequada a céu aberto, com poluição do solo, da água e do ar (Consoni & Peres, 1995; Reichert, 1999). Aterros sanitários bem construídos (impermeabilizados e com drenos de coleta de lixiviados), operados com eficiência (com cobertura de solo ao final de cada período de serviço) e em localização correta (onde a vulnerabilidade do aquífero subjacente não tenha índices altos) são alternativas seguras para muitos resíduos, mas não para todos (Oliveira e Pasqual, 2004).

Outro risco potencial são instabilidades geotécnicas em aterros com características específicas, como disposições em pilhas elevadas ou em pontas de aterro. Essa é uma alternativa interessante do ponto de vista de otimização de espaço, por possibilitar o acúmulo de materiais em quantidades muito superiores em relação a formas de disposição, como aterros em vala ou em patamar único, embora haja um desnível entre a extremidade superior e a base da pilha de resíduos. Tais soluções são adaptações usadas em obras de engenharia, em muitas das quais se utilizam materiais como solo, saprolito ou fragmentos de rocha, que, após o lançamento e compactação, resultam em estruturas relativamente homogêneas e contínuas, com possibilidade de controle da porosidade e permeabilidade internas pela seleção dos materiais, além de dispositivos externos para escoamento de águas superficiais.

Contudo, a adaptação desse procedimento em aterro é algo complexo em razão da heterogeneidade intrínseca dos materiais utilizados, além do fator principal, relacionado a modificações temporais ocasionadas por processos físico-químicos que resultam na liberação de líquidos e gases que, pelo escape ou migração, provocam a redução do volume total inicialmente disposto. Essa geração de líquidos é algo natural e resulta da decomposição da matéria orgânica contida nos resíduos, cujo entre materiais de decomposição bastante lenta como plástico ou borracha, resulta em risco geotécnico pela possibilidade de rastejo, escorregamento e fluxo de massa.

Os métodos geoeletricos são uma alternativa indireta de investigação efetiva em estudos geotécnicos, aplicada para determinação da espessura de solo, profundidade de

topo rochoso, zonas saturadas e insaturadas, dados essenciais para a realização de perfurações voltadas à coleta de amostras para ensaios geotécnicos.

O artigo intitulado “*Caracterização geofísica em aterro de resíduos sólidos para avaliação de condicionantes de instabilidade geotécnica*” descreve os resultados de uso da Eletorresistividade no diagnóstico de zonas de acúmulo de chorume num aterro em pilhas no município de Leme (SP), e a relação destas com eventos de escorregamento do solo de cobertura. Os resultados revelaram que a heterogeneidade intrínseca dos materiais que constituem um aterro pode resultar em caminhos preferenciais de fluxo e no acúmulo de bolsões de chorume, que localizados próximo ao solo de cobertura do aterro, podem resultar em escorregamentos de massa, exposição dos resíduos e instalação de nascentes de chorume nas laterais do aterro (Figura 4.1).

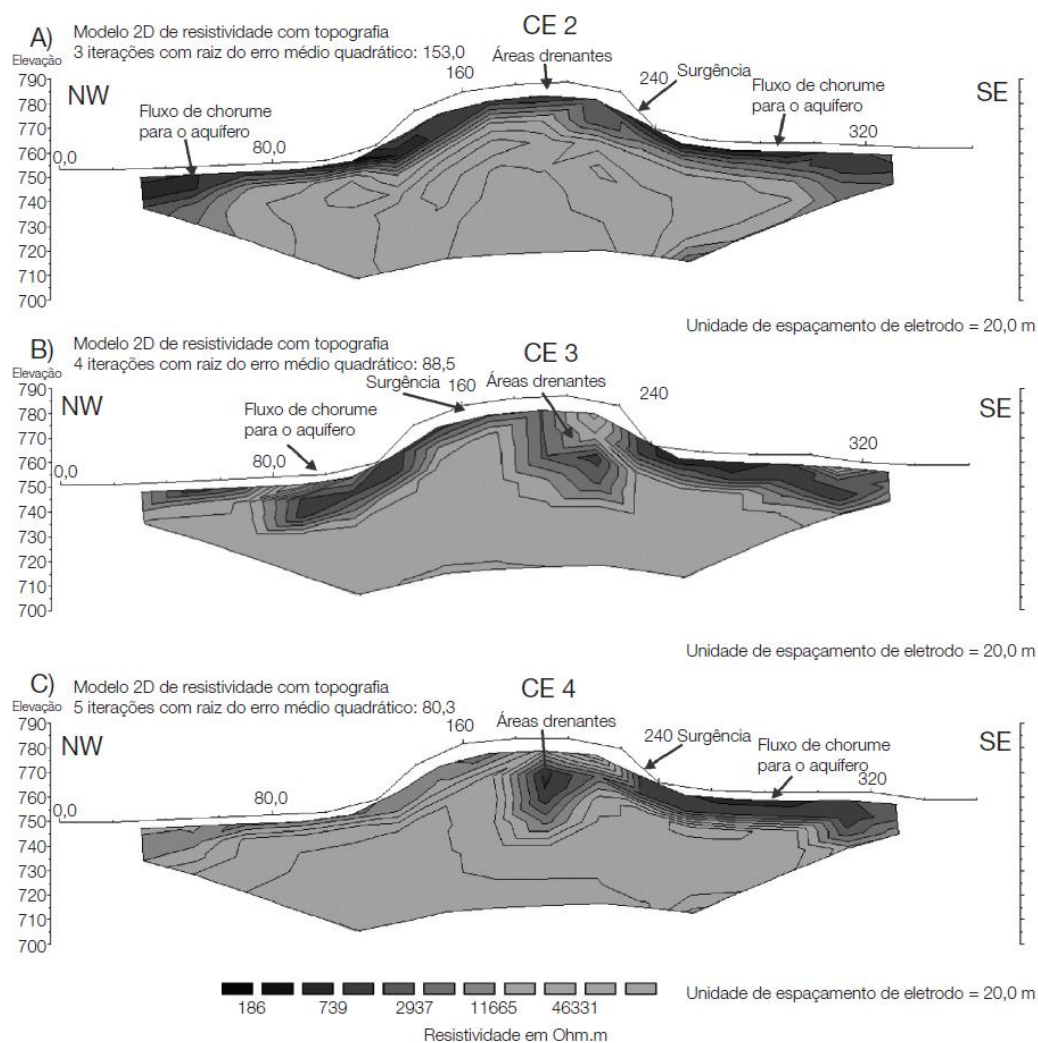


Figura 4.1 – Modelos de inversão de resistividade com topografia ajustada, com realce para zonas de acúmulo de chorume (áreas drenantes), pontos de nascente (surgência) e zonas de fluxo para o aquífero (Moreira *et al.* 2013).

4.2 - Estudos em barragens

A degradação crescente dos mananciais superficiais pelo lançamento de poluentes oriundos de esgotamento sanitário ou efluentes industriais, além de produtos químicos fertilizantes e defensivos agrícolas que também são carregados para rios e lagos, que alteram significativamente a qualidade das águas e as condições ambientais dos seres vivos aquáticos. A instalação de barragens em áreas de nascente é uma alternativa adotada para captação de água potencialmente de qualidade.

Barragens de terra são estruturas para armazenamento de água de grande simplicidade construtiva e um recurso muito utilizado em atividades rurais e em pequenos municípios, com vistas ao atendimento de demandas como: controle de cheias, irrigação, geração de energia, navegação, à regularização de vazão, abastecimento urbano e industrial, piscicultura, recreação, turismo, rejeitos industriais, dentre outros objetivos. As barragens tiveram um papel fundamental no desenvolvimento das civilizações. A sua construção era motivada, sobretudo, pela escassez de água no período seco e pela consequente necessidade de armazenamento de água, realizado por barragens executadas em bases empíricas (Costa, 2012).

Relatos acerca de falhas ou rupturas estruturais em barragens de terra são frequentes. Entre 2000 e 2009 foram relatados 140 incidentes apenas no Brasil, grande parte dos quais associadas a problemas de infiltração e erosão interna (*piping*). (Perini, 2009). Este tipo de barramento frequentemente não conta com projetos técnicos baseados em dados obtidos por meio de ensaios laboratoriais e de campo, ou mesmo na análise criteriosa de estabilidade (Paschoalin Filho, 2002).

A geofísica pode ser uma alternativa interessante para investigações preliminares e ao monitoramento de infiltrações em barragens de terra, diante do contraste de propriedades físicas elétricas, entre zonas com percolação de água e os materiais íntegros ao redor. Esta ferramenta, aliada a avaliação de aspectos visíveis em superfície resultantes de processos nocivos à integridade da estrutura, como a presença de ravina ou feições de escorregamentos, pode proporcionar uma avaliação adequada, rápida e de baixo custo ao monitoramento da integridade física de barragens de terra.

Nesta linha de pesquisa, o autor orientou uma dissertação de mestrado intitulada “*Análise de integridade física de barragens de terra a partir da integração do método geofísico da eletrorresistividade com ensaios geotécnicos*”, desenvolvida pelo geólogo

Pedro Lemos Camarero. Este trabalho integrou levantamentos de tomografia elétrica e ensaios geotécnicos em duas barragens de terra localizadas nos municípios de Cordeirópolis e Ipeúna (SP), uma predominantemente argilosa e outra arenosa, numa tentativa de verificação da integridade física das estruturas e indícios de infiltração de água e geração de *piping*.

A integração dos dados obtidos por métodos diretos com dados obtidos através de métodos indiretos agregou maior credibilidade aos resultados. No caso do presente estudo, os dados quantitativos dos ensaios de permeabilidade e índices físicos do solo fornecem embasamento às análises dos dados qualitativos da geofísica.

Os modelos de inversão foram importantes para o entendimento de tendências de fluxo hídrico dinâmico, embora este processamento atenuie áreas relevantes e identificáveis nos dados de resistividade elétrica medido. A integração dos dados 2D em modelos de visualização 3D possibilita a definição de volumes de baixa resistividade que podem ser diretamente relacionados com zonas de percolação de água (*piping*) (Figura 4.2 e 4.3).

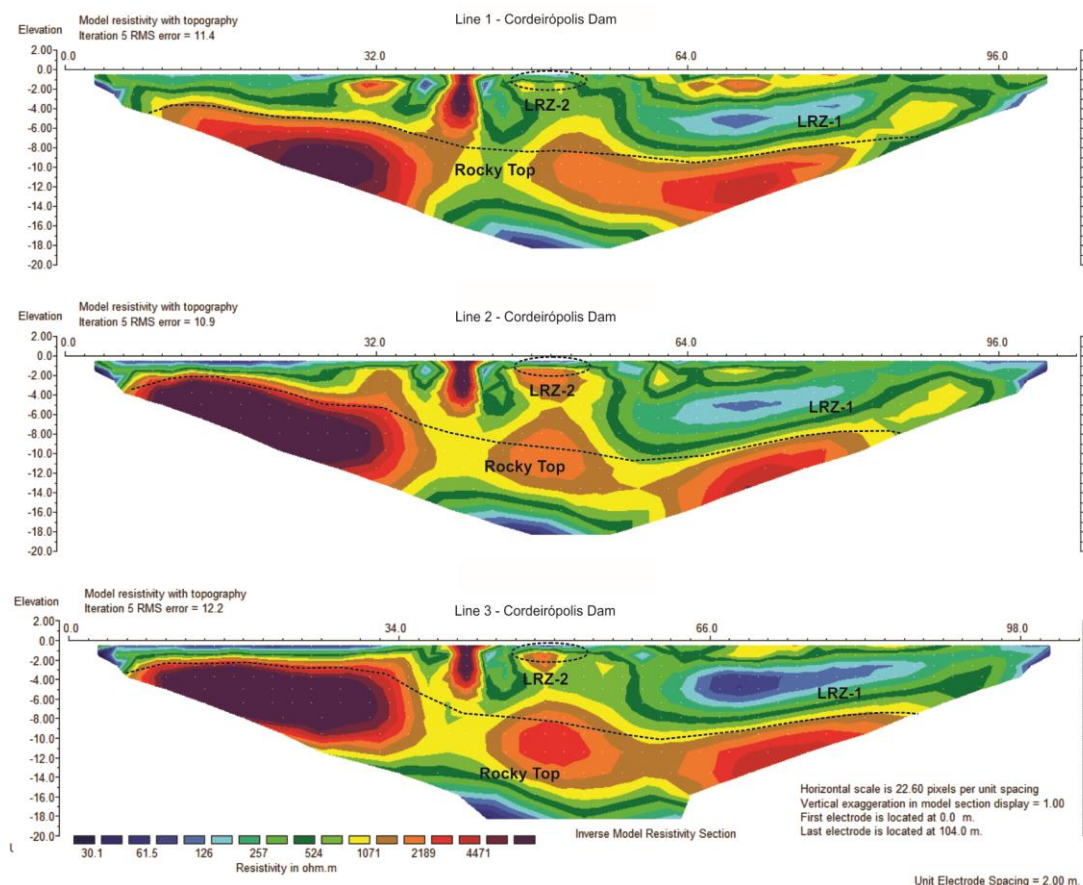


Figura 4.2 – Modelos de inversão de resistividade para barragem de Cordeirópolis, com realce do topo rochoso e zonas de infiltração (Camarero, 2016).

Apesar dos dados geofísicos apresentarem zonas de percolação e possivelmente infiltração de água, não é possível afirmar que a estrutura corre risco iminente de ruptura ou instabilidade. Não há indícios evidentes de degradação considerável na barragem e os dados de permeabilidade sugerem que o coeficiente de permeabilidade do solo da barragem de Cordeirópolis é tão baixo no corpo da barragem que, provavelmente a formação e desenvolvimento de um possível *piping* nas ZBRs demoraria aparentemente anos e talvez décadas para ocorrer de uma maneira efetiva que pudesse representar algum risco estrutural ao corpo da barragem.

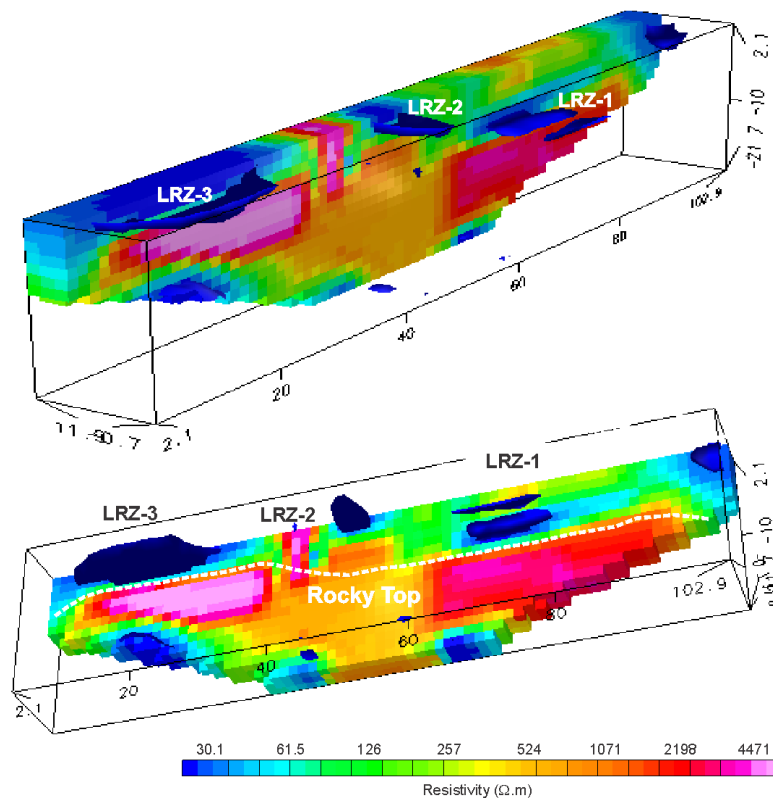


Figura 4.3 – Modelos de visualização 3D de resistividade elétrica com isosuperfícies de baixa resistividade (Camarero, 2016).

4.3 - Estudos em mineração

A lava de calcários a mármore é frequentemente simples, condicionada a determinação da espessura de solo por perfurações em malha relativamente espaçada. A lava de mármore com intrusivas num complexo sistema de fraturas é algo que demanda ferramentas não convencionais ou recursos de alto custo e que pode, em alguns casos, inviabilizar a atividade mineral (Sampaio & Almeida, 2005).

A aplicação de técnicas de reconhecimento prévio e a incorporação destas informações ao planejamento de curto e médio prazo da lavra de mármore devem proporcionar estimativas acerca do volume de material sulfetado e a alocação de áreas para acondicionamento final, com vistas ao menor impacto ambiental possível.

A utilização de métodos geofísicos no planejamento da lavra é uma alternativa de uso concomitante aos métodos diretos de investigação, bastante eficiente na definição da espessura da cobertura estéril. A presença de mineralizações sulfetadas em materiais estéreis na área de estudos torna bastante oneroso seu dimensionamento por métodos diretos, devido à necessidade de uma malha de perfuração bastante densa. Esta limitação é uma oportunidade ao estudo de tecnologias eficazes e de menor custo.

A localização geológica do jazimento estudado e a série de eventos geológicos responsáveis por sua gênese fazem com que a lavra desta rocha seja algo complexo, distinto da extração em depósitos sedimentares. Este cenário de alta complexidade é representado pela presença de intrusiva básica contidas em soleiras, diques e num intrincado sistema de fraturas, metamorfizadas em mármore e metandesitos. Os litotipos metabásicos são caracterizados por porções localizadas enriquecidas em sulfetos de ferro e cobre disseminados ou contidos em juntas e fraturas (CPRM, 2000).

O autor orientou o trabalho de especialização intitulado “*Recognition of sulfides zones in marble mine through comparative analysis of electrical tomography arrays in Caçapava do Sul (Brazil)*” desenvolvido pelo tecnólogo Evandro Gomes dos Santos.

Este trabalho envolveu a aplicação do método de Polarização Induzida (IP) em aquisições por meio de linhas de tomografia elétrica nos arranjos Wenner, Schlumberger e Dipolo-dipolo, numa mineração de calcário no município de Caçapava do Sul (RS), aliado ao reconhecimento geológico de zonas enriquecidas em sulfetos em frentes de lavra, numa tentativa de estabelecimento de assinatura geofísica de zonas com presença e ausência de sulfetos, além da análise do arranjo geoeletrico mais adequado em termos de sensibilidade e precisão.

Os dados foram processados em modelos de inversão 2D e interpolados em modelos de visualização 3D, revelaram resultados satisfatórios em auxílio ao planejamento de lavra. Os resultados deste trabalho possibilitaram análises acerca do arranjo geoeletrico mais adequado na definição de zonas sulfetadas em metabásicas contidas em mármore. O arranjo Wenner demonstrou resultados satisfatórios e diretamente correlacionais com a realidade geológica visível em campo (Figura 4.4).

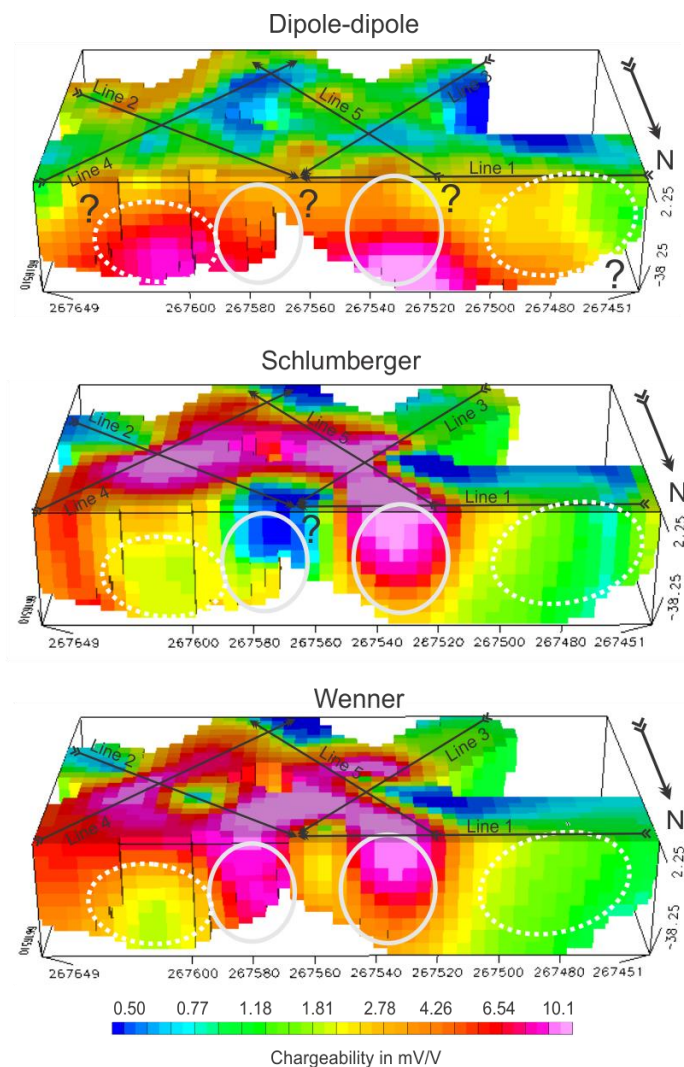


Figura 4.4 – Modelos de visualização 3D dos arranjos Dipolo-dipolo, Schlumberger e Wenner, com posicionamento das linhas de aquisição e vista parcial de metandesito em frente de lavra, com realce de zonas ricas e pobres em sulfetos (Moreira *et al.* no prelo).

5 - Estudos hidrogeológicos

A captação de água de qualidade para abastecimento público é atualmente um desafio ao gestor público municipal. O acesso ao recurso subterrâneo é uma alternativa, muito embora a exploração indiscriminada dos aquíferos, ausência de planejamento na ocupação territorial e a instalação de empreendimentos potencialmente contaminadores em zonas de recarga de aquíferos, contribuem para a poluição desta fonte em potencial.

Aplicações excessivas ou inadequadas de fertilizantes podem provocar a lixiviação de nitratos e cloretos, que podem facilmente ser carregados para as águas subterrâneas diante da fraca atenuação possibilitada na zona não saturada (Sainato *et al.* 2006). Em habitações rurais ou na periferia de pequenos municípios, o uso de fossas como recurso de saneamento básico é uma realidade nacional, com impactos diretos ao aquífero livre pelo aporte direto de elementos como cloreto e nitrato.

Estudos voltados ao entendimento de sistemas aquíferos, como fatores relativos à recarga, armazenamento, transmissividade, vulnerabilidade e definição de áreas favoráveis a perfuração de poços produtores, são fundamentais para disponibilidade deste importante recurso às futuras gerações (Hansen *et al.* 2010).

Ferramentas geofísicas são potencialmente importantes em estudos voltados à compreensão da dinâmica de sistemas aquíferos, diante da sensibilidade de parâmetros físicos como resistividade elétrica e cargabilidade e suas relações com propriedades hidráulicas (Mazac *et al.* 1985; Salem, 2001; Shevnin *et al.* 2006; Soupios *et al.* 2007; Peinado-Guevara *et al.* 2010; Okoro *et al.* 2010; Ezeh *et al.* 2013).

Estudos geofísicos e hidrogeológicos desenvolvidos no município de Caçapava do Sul (RS) em 2008 envolveram o cadastramento de poços cacimba, medidas de condutividade hidráulica, medidas de salinidade, sólidos totais dissolvidos, pH, Eh, aliados a Sondagens Elétricas Verticais, para medidas de resistividade elétrica e cargabilidade no horizonte aquífero raso. Este projeto envolveu diversas orientações de iniciação científica e monografia de conclusão de curso.

A análise estatística dos dados demonstrou relações variáveis entre condutividade hidráulica medida diretamente em poços rasos com os parâmetros físicos resistividade elétrica e cargabilidade, derivados do processamento, como transmissividade e condutância longitudinal, além do teor de sólidos totais dissolvidos em amostras de água coletados nos poços analisados (Figura 4.5).

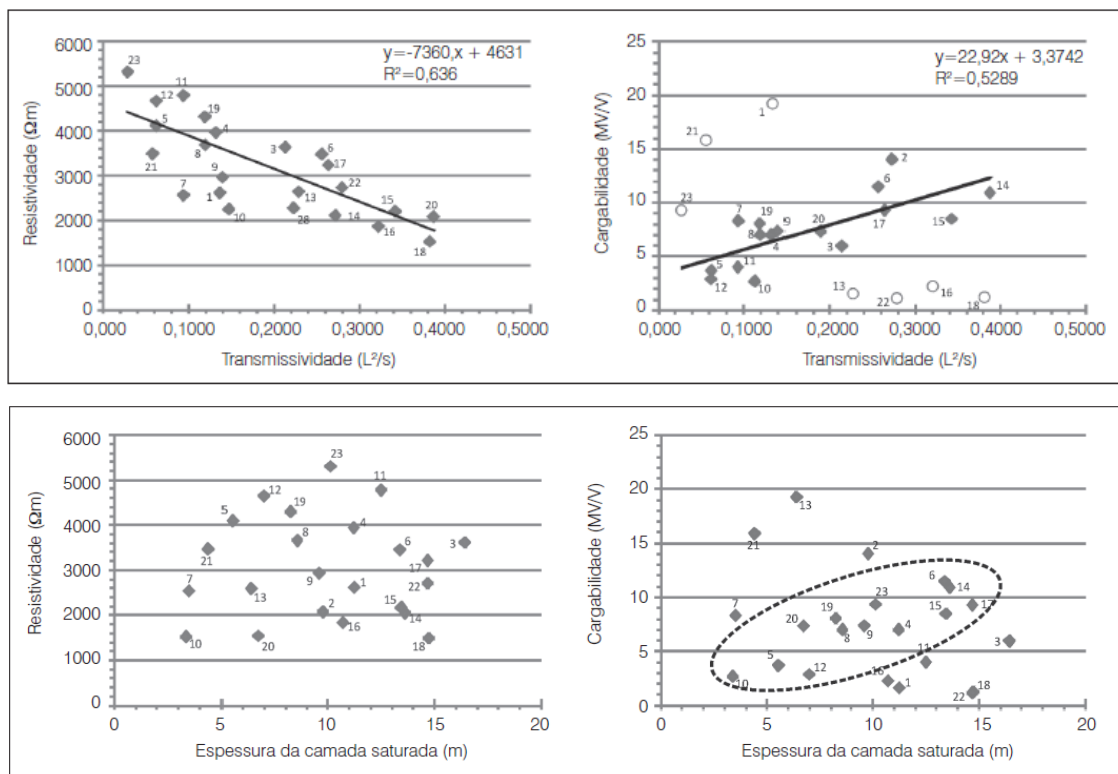


Figura 4.5 – Cruzamentos entre parâmetros geoeletricos e hidráulicos para o aquífero livre de Caçapava do Sul (RS), com linha de tendência, equação da reta, coeficiente de determinação R2 (Moreira *et al.* 2012c).

A relação inversamente proporcional entre resistividade elétrica e vazão é um dado altamente relevante em termos hidrogeológicos, onde a informação indireta permite estimar a produção de água antes da perfuração de poços (Figura 4.6).

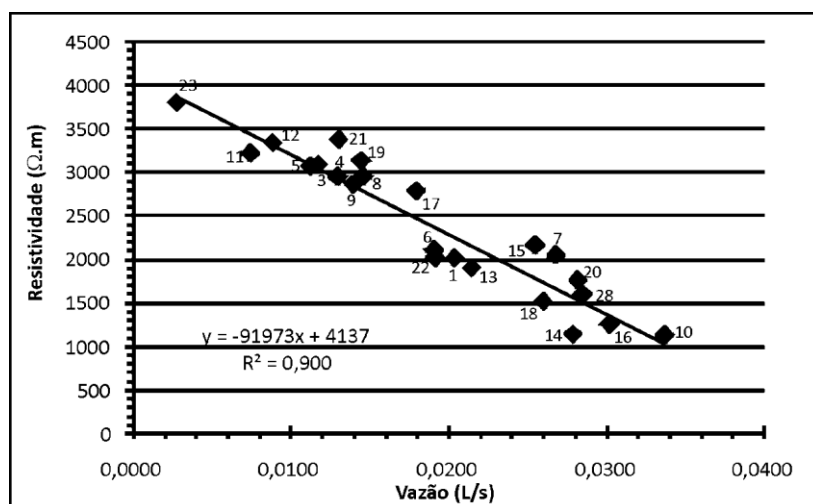


Figura 4.6 – Vazão *versus* resistividade, com linha de tendência, equação da reta, coeficiente de determinação (Moreira *et al.* 2013).

Nesta linha de pesquisa, o autor realizou um estudo concomitante entre zona de infiltração de fossa séptica a montante de um poço de captação subterrânea a jusante, por meio de linhas de tomografia elétrica para leituras de resistividade em arranjos Dipolo-dipolo, Wenner e Schlumberger, numa tentativa de análise de sensibilidade e resolução de cada arranjo, no modelamento de estruturas de fluxo como a de pluma de contaminação proveniente da fossa e de cone de depressão provocado pelo bombeamento de água por meio do poço (Figura 4.7).

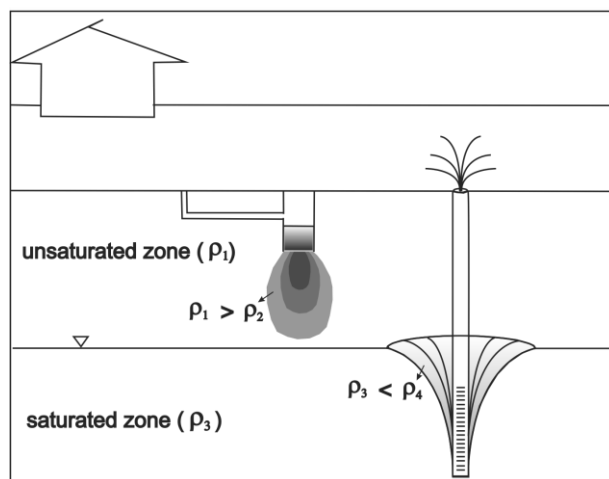


Figura 4.7 – Modelo de pluma de contaminação proveniente de fossa séptica e cone de depressão em poço de captação de água (Moreira *et al.* 2016).

As linhas de tomografia elétrica foram realizadas de forma paralela na área de influencia dos alvos em estudo, processadas para geração de modelos de inversão 2D e interpoladas lateralmente para geração de modelos de visualização 3D. Com objetivo de ajuste de forma das estruturas de fluxo, foi ajustado uma superfície de resistividade de $620\Omega.m$, adotado como o mais adequado em termos individuais e para fins comparativos, que corresponde aproximadamente a franja capilar do aquífero livre.

Os resultados referentes ao arranjo Dipolo-dipolo indicam que o modelamento resultou num produto totalmente desconexo da estrutura de pluma de contaminação no ambiente geológico. Contudo, os dados relativos a este arranjo permitiram o modelamento do cone de depressão em termos bastante razoáveis (Figura 2.52).

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 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 consequente modelamento do cone de depressão, possivelmente devido a questões de propagação de campo elétrico e potencial (Figura 2.52).

Os dados referentes ao arranjo Wenner permitiram o reconhecimento de uma estrutura no formato de quilha, associada ao cone de depressão e alongada da direção da linha central, totalmente desconexa da arquitetura real desta estrutura num aquífero. Este formato é atribuído a questões de sensibilidade lateral e procedimento de aquisição/interpolação dos dados (Figura 4.8).

Diante dos resultados desta pesquisa, o arranjo Dipolo-dipolo é recomendado em trabalhos de modelamento de estruturas tridimensionais verticalizadas de alta resistividade, como depósitos minerais. Os arranjos Wenner e Schlumberger são recomendáveis ao modelamento de estruturas tridimensionais verticalizadas de baixa resistividade, como plumas de contaminação.

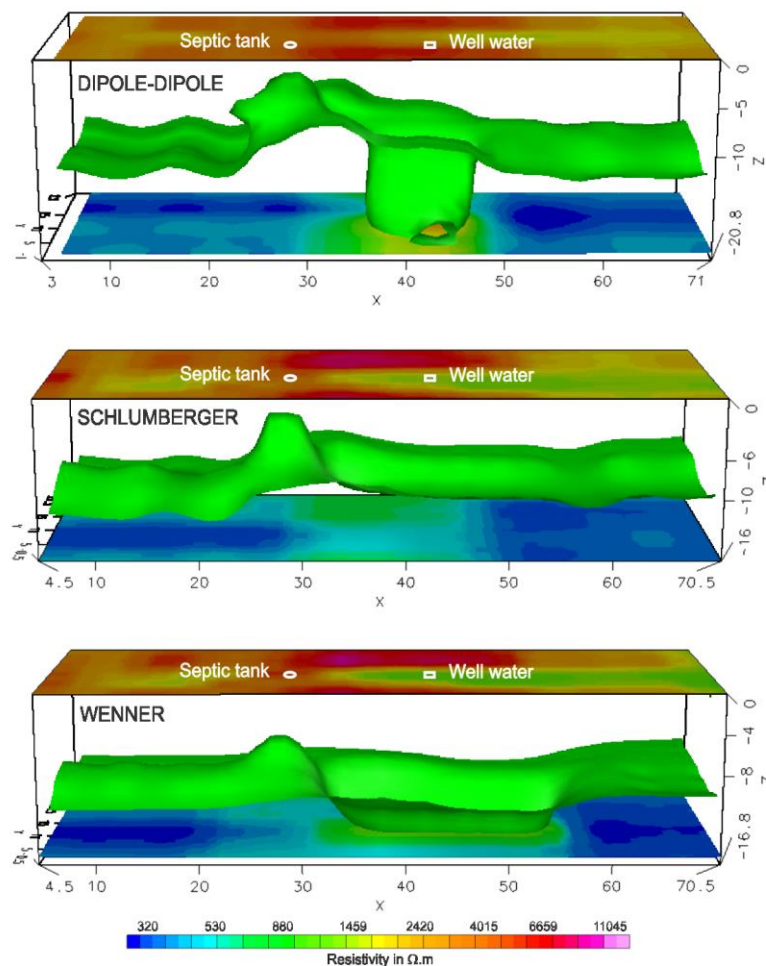


Figura 4.8 – Isosuperfícies 3D de 620Ω.m para os arranjos de aquisição em estudo, com posição da fossa séptica e do poço de captação de água (Moreira *et al.* 2016).

6 - Considerações finais

Este autor considera fundamentais conhecimentos básicos de geoquímica, bioquímica e hidrogeologia no planejamento, execução e, principalmente, análise e interpretação de dados geofísicos em estudos ambientais, caso seja desejado um modelo factível com a realidade. As principais classes de contaminantes (orgânicos, inorgânicos e metálicos) passam por transformações químicas e físicas no ambiente geológico, que alteram de forma significativa a resposta geofísica em termos de propriedades físicas. Neste sentido, a integração entre processos biogeoquímicos na análise de um padrão ou influências temporais e espaciais na resposta geofísica em estudos ambientais é, atualmente, a norma em publicações científicas de relevância na área.

A mera interpretação de variáveis geofísicas na ausência do suporte de informações diretas (histórico de eventos ou análises químicas) resulta em análises extremamente ambíguas e discutíveis, procedimentos que certamente serviram aos estágios iniciais de uso dos métodos geofísicos em estudos ambientais. A integração entre variáveis diretas e indiretas certamente será de praxe para a minimização de ambiguidades em estudos geofísicos ambientais.

A busca e adaptação de procedimentos de outras áreas das Geociências no aperfeiçoamento da geofísica também é algo de grande importância.

Os estudos desenvolvidos pelo autor em auxílio ao aproveitamento energético de Biogás em aterros sanitários foram inicialmente idealizados a partir da adaptação da técnica de perfilação em poços de petróleo, onde os métodos elétricos são utilizados há várias décadas. A premissa inicial foi baseada na elevada resistividade elétrica associada a camadas com acúmulo de gás em sistemas geológicos, confirmada em acumulações de biogás em aterro de resíduos. Os diversos trabalhos nesta linha estabelecem correlações entre áreas mais resistivas com zonas de maior produção de biogás, quantificada em drenos de emanção. Modelos de visualização 3D permitem ainda o reconhecimento de áreas com potencial de acumulação de biogás, passíveis de perfuração e eventual incremento na captação e projetos de geração de energia elétrica.

O modelamento 3D de depósitos minerais é uma rotina com mais de 20 anos em empreendimentos mineiros onde, a despeito da ausência de algoritmos de inversão de dados, a análise estatística de variáveis regionalizadas subordinadas ao controle do interprete quanto a condicionantes geológicos (estruturais, estratigráficos,

metalogenéticos), possibilita a quantificação de jazidas e definição de reservas (volume e teor), com elevado grau de precisão. Nestes casos, o modelamento é suportado frequentemente por dezenas de furos bastante espaçados e que resulta em dados analíticos pontuais e que exigem grandes extrapolações espaciais.

A avaliação de ocorrências minerais por aplicação de métodos geofísicos, em especial dos métodos elétricos e eletromagnéticos, exige conhecimentos amplos acerca de modelos de depósitos minerais e controles metalogenéticos de jazidas. Contudo, mesmo na ausência de dados químicos diretos, elementos como indícios de mineralização (carbonatação, silicificação, cloritização, veios de quartzo, lateritas, óxidos e sulfetos) podem ser empregados no planejamento e análise de dados geofísicos. A ausência de trabalhos diretos pode ser uma oportunidade de aplicação de métodos geofísicos, desde que devidamente amparados por variáveis ou condicionantes que proporcionem uma interpretação condizente com a realidade geológica.

Estudos geotécnicos e geofísicos conjuntos permitem uma análise abrangente e multipontual, como no reconhecimento de zonas de percolação de água em barragens de terra, assim como uma ferramenta de monitoramento. O reconhecimento prévio de estruturas de fluxo como fraturas ou *piping* em barragens de terra, por meio de procedimentos indiretos e de grande sensibilidade, pode evitar problemas de rompimento e catástrofes consequentes.

As contribuições em estudos hidrogeológicos são somadas a uma vasta quantidade de pesquisa nesta área, embora foquem em estimativas de propriedades hidráulicas por meio de equações que consideram propriedades geoelétricas. Os estudos desenvolvidos pelo autor demonstram a correlação inversa entre resistividade elétrica e vazão medida em poços de aquífero raso, resultado de aplicação direta dos métodos elétricos na estimativa prévia de produção de água em auxílio na definição de locais de maior favorabilidade para locação de poços.

A ocorrência de instabilidades geotécnicas como escorregamentos do solo de cobertura em aterros sanitários podem estar associadas a acumulações de chorume em áreas preferenciais. Estes locais podem ser previamente detectados por meio de métodos geoelétricos e, desta forma, possibilitar a implementação de sistemas de drenagem com o objetivo de minimizar este risco. Os métodos geoelétricos possuem ainda uma grande aplicação como ferramenta de definição de litotipos em auxílio à liberação de frentes de lavra, no âmbito do planejamento de curto prazo em empreendimentos mineiros.

7 - Perspectivas futuras

O autor pretende manter atuação em geofísica aplicada nas linhas de pesquisa mineral, estudos ambientais e hidrogeologia, por meio da busca de recursos financeiros em projetos de pesquisa ou parcerias com empresas e prefeituras.

Consolidar a linha de geofísica de exploração mineral é uma dos objetivos do autor no Departamento de Geologia Aplicada e no Programa de Pós-graduação em Geociências e Meio Ambiente, por meio de projetos de pesquisa e orientação de alunos de graduação e pós-graduação. Os dois projetos de pesquisa financiados por agências de fomento e coordenados pelo autor foram em pesquisa mineral, prática que deverá ser mantida no futuro. Atualmente são orientados 4 mestrados e 1 doutorado nesta linha, de alunos provenientes de cursos de geologia e geofísica de outras universidades.

Parcerias com a UNIPAMPA devem ser mantidas e estudos geofísicos em ocorrências minerais com histórico de dados geoquímicos no escudo Sulriograndense e bacia sedimentar do Camaquã certamente será uma alternativa de continuidade nesta linha de pesquisa. Existem ainda projeto em fase de planejamento para estudos de ocorrências de wolframita e ouro no Complexo Brusque (Santa Catarina), com visitas em campo de algumas ocorrências previamente estudadas por geoquímica de solo e alguns furos de sondagem pelo CPRM (Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais).

A continuidade de análise da arquitetura de ocorrências minerais e na avaliação de contaminações por meio de modelamento geofísico 3D também constituem objetivos futuros. A adaptação de técnicas da área de mineração em geofísica é uma experiência satisfatória na geração de modelos factíveis com a realidade geológica, em opção as técnicas de inversão geoeletrica 3D, que exigem uma quantidade significativamente maior de dados e aquisições relativamente trabalhosas em campo.

A experiência do autor em magnetometria por meio de uma orientação de mestrado, e em gamaespectrometria numa participação em projeto de pesquisa e artigo, permitiu um reconhecimento introdutório acerca do potencial destas ferramentas em pesquisa mineral, algo que deverá tratado no futuro. A retomada no uso de métodos eletromagnéticos e suas aplicações em pesquisa mineral e estudos ambientais também estão nos planos no autor.

Estudos de áreas contaminadas em fiscalização pela CETESB é uma linha de pesquisa ambiental particularmente atrativa, diante do fato da agência exigir o

monitoramento constante das atividades de descontaminação por parte do responsável. Estes relatórios são periodicamente enviados a agência e podem ser acessados por qualquer interessado e disponibiliza um histórico de análises químicas, dados construtivos de poços de monitoramento, estudos hidrogeológicos, dentre outros. O planejamento e investigação geofísica em áreas deste tipo proporcionam não somente o diagnóstico das dimensões da área contaminada, mas também a análise da eficácia dos processos de remediação e da existência de contaminantes de fase residual (solo) e fase dissolvida (água). O envolvimento de alunos nestes estudos, atualmente 2 mestrados e 1 doutorado, permite a capacitação profissional e vivência prática para atuação direta no mercado de trabalho, visto que os elementos básicos do estudo são os mesmos desenvolvidos por empresas de gestão ambiental, Além disso, a integração geoquímica e geofísica em estudos ambientais frequentemente proporcionar resultados satisfatórios para divulgação em periódicos científicos internacionais.

A questão de estudos em aterros sanitários em subsídio ao uso energético de biogás deverá ser continuada diante de diversas questões que surgem durante as pesquisas preliminares, que demonstraram a sensibilidade dos parâmetros geoeletricos em relações com a vazão de biogás em superfície. Entretanto, sazonalidades climáticas como chuvas e temperatura afetam a atividade de degradação anaeróbia e a produção de biogás. Estudos futuros devem versar em modelamentos 3D multitemporais no reconhecimento de variações em áreas de acumulação de biogás, além de medidas de potencial elétrico natural para reconhecimento de áreas de intenso consumo de matéria orgânica, atividade biológica que envolve um intenso fluxo de elétrons e que resulta na geração de biogás. A determinação de áreas de geração pode subsidiar ações técnicas de impermeabilização, manutenção das condições anaeróbias e da produção de biogás, ao passo que estudos da dinâmica de acumulação podem justificar a abertura de novos pontos de captação e, desta forma, resultar numa gestão mais previsível e de maior potencial em sistemas de geração energética.

Estudos integrados entre métodos geoeletricos e hidrogeologia deve ser uma linha de pesquisa a ser aperfeiçoada no futuro, principalmente diante da importância do tema frente à demanda crescente de água para abastecimento público, além da sensibilidade dos parâmetros geoeletricos no estudo de propriedades físicas em sistemas aquíferos. Atualmente são orientados 1 mestrado e 1 doutorado nesta temática, com assuntos que abordam salinidade natural de aquíferos e a assinatura geoeletrica

correspondente, além de análise da possibilidade de correlação entre vazões em poços e assinatura geoeletrica em aquíferos confinados. O desenvolvimento de estudos que demonstram o potencial de uso da geofísica como ferramenta de previsão de profundidade e vazão em aquíferos, é um procedimento de quantificação de dados geofísicos e uma temática de grande importância em termos científicos e tecnológicos.

A realização de estágio de pós-doutoramento no exterior também é algo planejado. A área de atuação do autor em geofísica aplicada em prática de campo demanda essencialmente um objeto de estudos ou área física, equipamentos e programas de processamento. Atualmente, os equipamentos e programas de processamento são relativamente acessíveis e basicamente equivalentes aos disponíveis em pesquisadores internacionais. Em tese, muito da pesquisa brasileira nesta área é de qualidade equivalente ou bastante próximo da literatura internacional, facilmente acessível em bases de dados, talvez com ressalvas em termos de produtividade devido necessidade de atuação em ensino, pesquisa, extensão e gestão do docente na universidade brasileira.

O desenvolvimento de pesquisas em contextos geológicos distintos dos casos brasileiros, o contato com outras culturas e idiomas são os verdadeiros grande motivadores de um estágio no exterior. Contudo, esta decisão dependerá dos rumos da universidade em relação à gestão de suas finanças e contratação de novos docentes e técnicos, além de disponibilidade de professor substituto durante o período de afastamento, para que não haja sobrecarga ainda maior a equipe departamental. O atual cenário inviabiliza esta iniciativa e as demandas imediatas e de curto prazo são aparentemente insolúveis num horizonte de 10 anos.

O envolvimento na gestão universitária como membro de comissões, conselho de programa de pós-graduação e na atual chefia de departamento é algo desafiador e por vezes desgastante, mas imprescindível e imediato. A atual configuração da universidade brasileira requer o envolvimento docente em atividades de gestão.

A universidade passa por um momento de renovação do quadro docente e técnico por aposentadorias e mudanças no regime de previdência, num contexto de endividamento e crise econômica sem precedentes. A consequência é a redução do quadro de servidores e aumento de trabalho para os próximos anos. Entendemos que a participação no planejamento e tomadas de decisão na gestão universitária hoje é fundamental para viabilidade de todo planejamento individual, de Departamento e Instituto em termos de ensino, pesquisa e extensão no futuro.

8 - Referencias

Abdel Aal G.Z., Slater L.D., Atekwana E.A., 2006, Induced-polarization measurements on unconsolidated sediments from a site of active hydrocarbon biodegradation. *Geophysics* 71:13–24.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1989, NBR 10703: Degradação do Solo. Rio de Janeiro, ABNT, Normas Técnicas, 41 p.

Allen J.P., Atekwana E.A., Atekwana E.A., Duris J.W. Werkema D.D., Rossbach S., 2007, The microbial community structure in petroleum-contaminated sediments corresponds to geophysical signatures. *Applied and Environmental Microbiology*, 73: 2860–2870.

Angeli N., Khan H., Ito G.M., Carvalho S.G., Jimenez-Rueda J.R., Penha U.C., 2011, Geologia e caracterização tecnológica do minério de manganês da mina córrego do Cocho, Itapira (SP). *Geologia USP Série Científica*, 11:3, 107–130.

Aquino W.F., 2000, Métodos Geofísicos Eletromagnéticos aplicados ao diagnóstico da contaminação de Solo e das Águas Subterrâneas em área de Infiltração de Resíduos Industriais. 121f. Dissertação (Mestrado em Geociências), Universidade de São Paulo, São Paulo.

Arango-Galván C., Flores-Márquez E.L., Hernández-Espriú J.A., Arias-Paz A., Sagahón-López E.J., 2016, Shallow geoelectrical characterization of a small portion of the Basin of Mexico aquifer: Towards a better resource management. *Geofísica Internacional*, 55, 3, 215-225.

Artur A.C. 1980. Rochas metamórficas dos arredores de Itapira-SP. 94f. Dissertação (Mestrado em Geociências), Universidade de São Paulo, São Paulo.

Atekwana E.A., Sauck W.A., Werkema D.D., 2000, Investigations of geoelectrical signature at a hydrocarbon contaminated site. *Journal of Applied Geophysics*, 44: 167–180.

Barth T., Riis M., 1992, Interactions between organic acid anions in formation waters and reservoir mineral phases. *Organic Geochemistry*, 19:4-6, 455-482.

Benson A. K., 1995, Applications of ground penetrating radar in assessing some geological hazards: examples of groundwater contamination, faults, cavities. *Journal of Applied Geophysics*, 33: 177–193.

Borchert H., 1970, On the ore-deposition and geochemistry of manganese. *Mineralium Deposita*, 53: 300–314.

Braga, A.C.O., Moreira C.A., Cardinalli, M.T., 2008, Variação temporal da resistividade elétrica em contaminação por gasolina. 27:4, 517-525.

Braga A.C.O., Moreira C.A., 2012, Monitoramento da atenuação natural de álcool etílico hidratado combustível em escala laboratorial por meio de métodos geofísicos. *Águas Subterrâneas*, 26:1, 19-26.

BRASIL – Ministério dos Transportes, 2014, Transporte Ferroviário. Disponível em: < <http://www.transportes.gov.br/transporte-ferroviario-relevancia.html> >. Acesso em: 02 de jun. de 2016.

Camarero P.L., 2016, Análise de integridade física de barragens de terra a partir da integração do método geofísico da Eletrorresistividade com ensaios Geotécnicos. 98f. Dissertação (Mestrado em Geociências), Universidade Estadual Paulista – UNESP, Rio Claro.

Carneiro H.P., 2016. Integração de dados geofísicos e estruturais no estudo de ocorrência de cobre localizada na região norte da bacia sedimentar do Camaquã (RS).

86f. Dissertação (Mestrado em Geociências), Universidade Estadual Paulista – UNESP, Rio Claro.

Castro M.C.A.A., Bello P.P.G., 2010, Evaluation of percentage of methane gas generated in the landfill of the Rio Claro city, Brazil: study of energetic potential,” in Proceedings of the 3rd International Symposium on Energy from Biomass and Waste, vol. 1, Venice, Italy,

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 1997, Relatório do levantamento geofísico para diagnóstico da contaminação da indústria Sulfabrás, CETESB, São Paulo, 91 p.

CETESB/SMA, 2006, Biogás: Pesquisa e Projetos no Brasil, CETESB/SMA, São Paulo, Brasil, 186p.

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 2015, Relatório de qualidade das águas subterrâneas no Estado de São Paulo. CETESB, São Paulo, 28–29.

Consoni A.J., Peres C., 1995, Origem e composição do lixo. In: Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado. São Paulo: IPT/CEMPRE, Capítulo II, 204p.

Côrtez A.R.P, 2015, Integração de dados geofísicos e geológicos na caracterização morfológica de ocorrência de cobre na borda norte da bacia do Camaquã (RS). 109f. Dissertação (Mestrado em Geociências), Universidade Estadual Paulista – UNESP, Rio Claro.

Côrtez A.R.P, Moreira C.A., Veloso D.I.K., Vieira L.B., Bergonzoni F.A., 2016, Geoelectrical prospecting for a copper-sulfide mineralization in the Camaquã sedimentary basin, Southern Brazil. Geofísica Internacional, 55:3, 165-174.

Costa W.D., 2012, Geologia de Barragens. Oficina de Textos, São Paulo, 352p.

CPRM – Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais, 1995, Folha Passo do Salsinho Folha SH. 22-Y-A-I-4 Estado do Rio Grande do Sul (1:50.000) - Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil, CPRM, Brasília, 358p.

CPRM – Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais, 2000, Folha Cachoeira do Sul, Rio Grande do Sul, Escala 1:250.000. CPRM, Brasília, 86 pp.

Delgado-Rodríguez O., Shevnin V., Ochoa-Valdés J., Ryjov, A., 2006, Geoelectrical characterization of a site with hydrocarbon contamination caused by pipeline leakage. *Geofísica Internacional*, 45, 63-72.

Delgado-Rodríguez O., Flores-Hernández D., Amezcua-Allieri M.A., Shevnin V., Rosas-Molina A., Marín-Córdova S., 2014, Joint interpretation of geoelectrical and volatile organic compounds data: a case study in a hydrocarbons contaminated urban site. *Geofísica Internacional*, 53, 183-198.

Dentith M., Mudge S.T., 2014, *Geophysics for the mineral exploration geoscientist*. Cambridge University Press, Cambridge, 516p.

Diniz, S.F., Moreira C.A., Corradini F.A., 2008, Susceptibilidade erosiva no baixo curso do rio Acaraú-CE. *Geociências*, 27:3, 355-367.

Dourado J.C., Moreira C.A., Malagutti Filho W., Fernandes M.A., 2013, Sísmica de refração no domo estrutural de Pitanga, Rio Claro (SP). *Geociências*, 32:4, 640-649.

Ensinas V.A., 2003. Estudo da Geração de Biogás no Aterro Sanitário Delta de Campinas-SP. 143f. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas.

Ezeh C.C., Ugwu G.Z., Okonkwo A., Okamkpa J., 2013. Using the relationships between geoelectrical and hydrogeological parameters to assess aquifer productivity in Udi LGA, Enugu State, Nigeria. *International Research Journal of Geology and Mining*, 3, 9-18.

Evangelou B., 1998, Environmental soil and water chemistry: principles and applications. John Wiley & Sons, New York, 577p.

Fernandes M.A., Malagutti Filho W., Dourado J.C., Moreira C.A., 2013, Modelagem gravimétrica no lineamento Guapiara, sul do Estado de São Paulo. Revista do Instituto Geológico, 34:1, 69-77.

Frakes L., Bolton B.R., 1992, Effects of ocean chemistry, sea level, and climate on the formation of primary sedimentary manganese ore deposits. Economic Geology, 87:5, 1207–1217.

Gadde R.R., Laitinen H.A., 1974, Studies of heavy metal adsorption by hydrous iron and manganese oxides. Anal. Chem., 46, 2022--2031.

Godoy L.H., Sardinha D.S., Bertini R.J., Conceição F.T., Del Roveri C., Moreira C.A., 2013, Potencial geoparque de Uberaba (MG): geodiversidade e geoconservação. Sociedade & Natureza, 25:2, 395-410.

Hansen M.A.F., Lima J.P.R., Fries M., Moreira, C.A., 2010, Importância da geofísica no estudo das águas. In: Adilson Ben da Costa. (Org.). Água e Saúde. Porto Alegre: UNISC, 200-230.

Harter, R.D., 1977, Reactions of minerals with organic compounds in soil. In: Dixon, J.B.; Weed, S.B. (Eds.). Minerals in the soil environment. Madison, p 709-739.

Hem J.D., 1978, Redox processes at the surface of manganese oxide and their effects on aqueous metal ions. Chemical Geology, 21, 199-218

Hem J.D., Roberson C.E., Lind, C.J., 1985, Thermodynamic stability of CoOOH and its coprecipitation with manganese. Geochimica and Cosmochimica Acta, 49, 801–810.

Hernández-Soriano M.C., 2014, Environmental risk assessment of soil contamination. InTech, New York, 905p.

Hiebert F.K., Bennett P.C., 1992, Microbial control of silicate weathering in organic-rich groundwater. *Science*, 258: 5080, 278-281.

Hillel D., Rosenzweig C., Powlson D., Scow K., Singer M., Sparks D.. 2004, *Encyclopedia of soils in the environment – volume one*. Academic Press, New York, 2002p.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change, 1996, *Guidelines for National Greenhouse Inventories: Reference Manual*, vol. 3.

Junta J.L., Hochella Jr. M.F., 1994, Manganese (II) oxidation at mineral surfaces: A microscopic and spectroscopic study. *Geochimica and Cosmochimica Acta*, 58, 4985–4999.

König L., Weiss J.L., 2009, *Groundwater: modelling, management, and contamination*. Nova Science Publishers Inc., New York, 422p.

Laquidara M.J., Leuschner A.P., Wise D.L., 1986, Procedure for determining potential gas quantities in an existing sanitary landfill. *Water Science and Technology*, vol. 18, n°12: 151–162.

Lehr J., Hyman M., Gass T.S., Servers W.J., 2001, *Handbook of complex environmental remediation problems*. McGraw-Hill Handbooks, 606p.

Licht O.A.B., 1998, *Prospecção Geoquímica: Princípios, Técnicas e Métodos*. Serviço Geológico do Brasil, Rio de Janeiro, 148p.

Loganathan P, Burau R.G., 1973, Sorption of heavy metal ions by a hydrous manganese oxide. *Geochimica and Cosmochimica Acta*, 37, 1277–1293.

Lowrie W., 2007, *Fundamentals of Geophysics*. Cambridge University Press, New York, 393p.

Maynard J.B., 2003, Manganiferous sediments, rocks, and ores. Treatise on Geochemistry, London, v. 7, p. 289–308.

Marjoribanks R., 2010, Geological methods in mineral exploration and mining. 2^oed., Springer, Heidelberg, 248p.

Mazac O., Kelly W.E., Landa, I., 1985, A hydrogeophysical model for relations between electrical and hydraulic properties of aquifers. *Journal of Hydrology*, 79, 1-19.

McCabe C., Sassen R., Saffer B., 1987, Occurrence of secondary magnetite within biodegraded oil. *Geology*, 15:1, 7-10.

McKenzie R.M., 1972, The sorption of some heavy metals by the lower oxides of manganese. *Geoderma*, 8, 29–35.

McMahon P.B., Chapelle F.H., 1991, Microbial production of organic acids in aquitard sediments and its role in aquifer geochemistry. *Nature*, 349, 233-235.

MME - Ministério das Minas e Energia, 2011, Plano Nacional de Mineração 2030- Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Brasília: MME, 180p.

Mondelli G., Giacheti H.L., Boscov M.E.G., Elis V.R., Hamada J. 2007. Geoenvironmental Site Investigation using different techniques in a Municipal Solid Waste Disposal Site in Brazil. *Environmental Geology*, 52:871-887.

Moon C.J., Whateley M.E.G., Evans A.M., 2006, Introduction to Mineral Exploration. Backwell Publishing, Oxford, 499p.

Moreira C.A., Dourado J.C., 2005, Análise de contaminantes de fase líquida não aquosa (NAPLs) por aplicação do método Eletromagnético Indutivo (EM). *Revista Brasileira de Geofísica*, 23:3, 213-220.

Moreira C.A., Dourado J.C., Braga A.C.O., 2006, Aplicação da técnica de caminhamento elétrico em área contaminada por derivados de petróleo. *Revista Brasileira de Geofísica*, 24:3, 383–392.

Moreira C.A., Dourado J.C., 2007a, Monitoramento da Atenuação Natural de pluma de contaminação pelo método de Radar de Penetração no Solo (GPR). *Revista Brasileira de Geofísica*, 25:4, 389–398.

Moreira C.A., Aquino W.F., Dourado J.C., 2007b, Aplicação do método Eletromagnético Indutivo (EM) no monitoramento de contaminantes em subsuperfície. *Revista Brasileira de Geofísica*, 25:4, 413–420.

Moreira C.A., Dourado J.A., Santos K., 2007c, Geofísica aplicada no estudo de área de lançamento de efluentes de tratamento de esgoto. *Geociências*, 26:1, 17-25.

Moreira C.A., Braga A.C.O., 2008, Aplicação do método de polarização induzida em aterro controlado. *Geociências*, 27:2, 219-227.

Moreira C.A., Braga A.C.O., 2009a, Decomposição de resíduos sólidos domiciliares e variações na resistividade e cargabilidade. *Revista Brasileira de Geofísica*, 27:2, 283-293.

Moreira C.A., Braga A.C.O., 2009b, Caracterização geoeletrica de contaminantes provenientes da decomposição de resíduos sólidos domiciliares. *Revista Ambiente & Água*, 4:2, 106-114.

Moreira C.A., Braga A.C.O., Fries M., 2009c, Degradação de resíduos e alterações na resistividade elétrica, pH e Eh. *Revista Brasileira de Geofísica*, 27:2, 283-293.

Moreira C.A., Braga A.C.O., Hansen M.A.F., 2011a, Estimativa do tempo de produção de chorume em aterro controlado por meio de medidas de resistividade elétrica. *Revista Brasileira de Geociências*, 41:3, 548-557.

Moreira C.A., Oliveira M.T., Silva A.C., 2011b, Estudo geofísico em aterro controlado disposto sobre rochas fraturadas. *Revista Ambiente & Água*, 6:2, 180-190.

Moreira C.A., Ilha L.M., 2011, Prospeção geofísica em ocorrência de cobre localizada na bacia sedimentar do Camaquã (RS). *Revista Escola de Minas*, 64:3, 305-311.

Moreira C.A., Lopes S.M., Schweig C., Seixas A.R., 2012a, Geoelectrical prospection of disseminated sulfide mineral occurrences in Camaquã sedimentary basin. *Revista Brasileira de Geofísica*, 30:2, 169-179.

Moreira C.A., Borges M.R., Vieira G.M.L., 2012b, Malagutti Filho W., Montanheiro M.A.F., Geological and geophysical data integration for delimitation of mineralized areas in a supergene manganese deposits. *Geofísica Internacional*, 53, 2, 201-212.

Moreira C.A., Cavaleiro, M.D, Pereira A.M., Caron F., 2012c, Relações entre condutividade hidráulica, transmissividade, condutância longitudinal e sólidos totais dissolvidos para o aquífero livre de Caçapava do Sul (RS), Brasil. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 17:2, 193-202.

Moreira C.A, Braga A.C.O., Godoy L.H., Sardinha D.S., 2013a, Relationship between age of waste and natural electric potential generation in Sanitary Landfill. *Geofísica Internacional*, 52:4, 375-383.

Moreira C.A, Braga A.C.O., Martinelli C.D., 2013b, Investigação geofísica em aterro municipal de resíduos sólidos domiciliares, Cordeirópolis, Brasil. *Geotecnia (Lisboa)*. 127, 105 - 116.

Moreira C.A, Godoy L.H., Sardinha D.S., Conceição F.T., Del Roveri C., 2013c, Caracterização geofísica em aterro de resíduos sólidos para avaliação de condicionantes de instabilidade geotécnica. *Geologia USP Série Científica*. 13:1, 25-34.

Moreira C.A., Cavalheiro, M.D, Pereira A.M., Sardinha D.S., 2013d, Análise das relações entre parâmetros geoeletricos e vazões para o aquífero livre de Caçapava do Sul (RS). *Águas Subterrâneas*, 27:3, 45-59.

Moreira C.A., Pereira A.M., Cavalheiro, M.L.D., 2014a, Caracterização geoeletrica do gabro Santa Catarina, São Sepé (RS). *Pesquisas em Geociências*, 41:1, 15-23.

Moreira C., Castro M., Gonsalez A., Cavallari F., Munhoz T., Pereira A., 2014b, Comparative Analysis between Biogas Flow in Landfill and Electrical Resistivity Tomography in Rio Claro City, Brazil. *Journal of Geological Research*, Article ID 845906.

Moreira C.A., Castro M.C.A., Carrazza L.P., Cavallari F., Helene L.P.H., Machado F.B., 2015a, Relationship between biogas production and variations in electric resistivity in landfill of Rio Claro city, Brazil. *Revista Brasileira de Geofísica*, 33:2, 217-224.

Moreira C.A., Munhoz T., Cavallari F., Helene L.P.H., 2015b, Electrical resistivity to detect zones of biogas accumulation in a landfill. *Geofísica Internacional*, 54:4, 353-362.

Moreira C.A, Borsatto K., Ilha L., Santos S.F., Rosa F.T.G., 2016a, Geophysical modeling in gold deposit through DC Resistivity and Induced Polarization methods. *Revista da Escola de Minas*, 69:3, 293-299.

Moreira C.A., Lapola M.M., Carrara A., 2016b, Comparative analyzes among electrical resistivity tomography arrays in the characterization of flow structure in free aquifer. *Geofísica Internacional*, 55:2, 119-129.

Moreira C.A, Helene L.P.I., Côrtez A.R.P., 201X, Indications of mineralization from Induced Polarization data in the contaminated area for diesel. *Geofísica Internacional*, *no prelo*.

Moreira C.A, Santos E.G, Ilha L.M., Paes R., 201X, Recognition of sulfides zones in marble mine through comparative analysis of electrical tomography arrangements in Caçapava do Sul (Brazil). *Geofísica Internacional*, *no prelo*.

Moreira C.A, Vieira L.B, Reis S.S., 201X, Geoelectric modeling of the supergenic manganese occurrence. *Revista Brasileira de Geofísica*, *no prelo*.

Nardy A.J.R., Moreira C.A., Machado F.B., Luchetti A.C., Hansen M.A.F., Rossini A.J., Barbora Júnior, W., 2014, Gamma-ray spectrometry signature of Paraná volcanic rocks: preliminar results. *Geociências*, 33:2, 216-227.

Newell C.J., Acree S.A., Ross R.R., Huling S.G., 1995, Light Nonaqueous Phase Liquids. Ground Water Issue, Environmental Protection Agency, Oklahoma, 25p.

Moura H.P., Malagutti Filho W., 2003, Métodos de Eletrorresistividade e Polarização Induzida aplicados na área de disposição de resíduos urbanos: aterro controlado de Rio Claro, SP. *Geociências*, 22, 129-139.

Okoro E.I., Egboka B.C.E., Onwuemesi A.G., 2010, Evaluation of the aquifer characteristic of Nanka sands using hydrogeological method in combination with Vertical Elec-trical Sounding (VES). *Journal Applied Environmental Management*, 14, 5-9.

Oliveira S., Pasqual A., 2004, Avaliação de parâmetros indicadores de poluição por efluente liquido de um aterro sanitário. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 9:3, 240-249.

Oliveira M.T., Moreira C.A., Menezes A.M.C., 2011, Aplicação do método de polarização induzida em área de disposição de resíduos sólidos no município de Caçapava do Sul – RS. *Revista Brasileira de Geofísica*, 29:2, 377-384.

Pankow, J.F., Cherry, J.A., 1996, Dense chlorinated solvents and other DNAPLs in Groundwater. Waterloo Press, 522p.

Paschoalin Filho J.A., 2002, Utilização de solo residual de diabásio como elemento de fundação e material de construção de aterros compactados para barragens de pequeno porte. 171f. Dissertação (Mestrado em Construções), Universidade de Campinas – UNICAMP, Campinas.

Peinado-Guevara H.J., Green-Ruiz C. R., Delgado-Rodriguez O., Herrera-Barrientos J., Belmonte-Jiménez S., Torrez M.A.L.G., Shevnin V., 2010, Estimación de la conductividad hidráulica y contenido de finos a partir de leyes experimentales que relacionan parámetros hidráulicos y electricos. *Ra Zimhai*, 6, 45-57.

Pereira A.M., Moreira C.A., Bortolin J.R.M., Lopes S.M., Nardy A.J.R., 2015, Magnetometric exploration in intrusive basic with evidence of gold in northern region of the Camaquã Sedimentary Basin (RS). *Revista da Escola de Minas*, 68:2, 163-169.

Pereira H.G., Malagutti Filho W., Fries M., Moreira C.A., 2016, Prospecção geofísica entre as ocorrências cupríferas Capão Grande e Victor Teixeira, Caçapava do Sul – RS. *Geociências*, 35:1, 16-30.

Perini D.S., 2009, Estudo dos processos envolvidos na análise de riscos de barragens de terra. 2009. 149f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Universidade de Brasília – UNB, Brasília.

Pirajno F., 1992, Hydrothermal mineral deposits: Principles and fundamental concepts for the exploration geologist. Berlin: Springer-Verlag, 1250p.

Porciúncula R.J. & Lima O. A. L., 2012, Geoelectric evaluation of subsurface contamination at a gas and service station, Alagoinhas, BA, Brazil. *Revista Brasileira de Geofísica*, 30:2, 201-212.

Reichert G. A., 1999, Gerenciamento integrado de resíduos, uma proposta inovadora. *Ciência e Ambiente*, 18, 78-102.

Roy S., 1992, Environments and processes of manganese deposition. *Economic Geology*, 87, 1218–1236.

Roy S., 1997, Genetic diversity of manganese deposition in the terrestrial geological record. *Geological Society, London, Special Publications*, 119:1, 5–27.

Sainato C.M., Losinno B.N., Galindo G., Landini A.M., Fazio A.M., 2006, Geofísica aplicada a la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación en zonas rurales de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Águas Subterrâneas*, 20, 71-82.

Santos A.A., Shiraiwa S., Silvino A.N.O., Silva W.T.P., Silva N.A., Silveira A., Migliorini R.B., 2009, Comparação entre investigação direta da água subterrânea e Radar de Penetração no Solo (GPR) na área do aterro sanitário de Cuiabá (MT). *Revista Brasileira de Geociências*, 39:4, 768-722.

Santos A.C.O., Mello F.V., Kamphorst J.S.C., Moreira C.A., 2014, Estudos geoeletricos em aterro controlado no município de Caçapava do Sul – RS. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental – REGET*, 18:1, 99-112.

Sara M., 2003, Site assessment and remediation handbook. 2^oed., Lewis Publishers, Florida, 1161p.

Sauk W. A., 2000, A model for the resistivity structure of LNAPL plumes and their environs in sandy sediments. *Applied Geophysics*, 44, 151–165.

Seixas A.R., Nardy A.J.R., Moreira C.A., Pereira A.M., 2015, Caracterização magnetométrica do sítio de Limeira – SP. *Geociências*, 34:2, 169-184.

Silva R.W.C., Malagutti Filho W., Moreira C.A., 2009, Emprego do método da Eletroresistividade no estudo da contaminação subterrânea do cemitério municipal de Vila Rezende, Piracicaba – SP. *Revista Brasileira de Geofísica*, 27:3, 389-399.

Stoessel R.K., Pittman E.D., 1990, Secondary porosity resisted: the chemistry of feldspar dissolution by carboxylic acids and anions. *American Association of Petroleum Geology*, 74, 1795-1805.

Stone A.T., Morgan J.J., 1984, Reduction and dissolution of manganese (III) and manganese (IV) oxides by organics: 2. Survey of the reactivity of organics. *Environ. Sci. Technol.*, 18:8, 617–624.

Oonk J., Boon A., 1995, Landfill Gas Formation, Recovery and Emissions. Institute of Environmental and Energy Technology, Apeldoorn, Netherlands, 323-328.

Sampaio J.A., Almeida S.L.M., 2005, Rochas & Minerais Industriais: Usos e Especificações. CETEM, Rio de Janeiro, 350p.

Salem H.S., 2001, Modelling of Lithology and Hydraulic Conductivity of Shallow Sediments from Resistivity Measurements using Schlumberger Vertical Electric Soundings. *Energy Sources*, 23, 599-618.

Shevnin V., Delgado-Rodríguez O., Mousatov A., Ryjov A., 2006, Estimation of Hydraulic Conductivity on Clay Content in Soil. *Geofísica Internacional*, 45, 195-207.

Silva A.C., Dourado J.C., Moreira C.A., 2011, Aplicação da Eletroresistividade na caracterização do meio hidrogeológico na cidade de Ji-Paraná (RO). *Geociências*, 30:4, 641-650.

Soupios P.M., Kouli M., Vallianatos F.; Vafidis A., Stavroulakis G., 2007, Estimation of Aquifer Hydraulic Parameters from Surficial Geophysical Methods: A Case Study of Keritis Basin in Chania (Crete – Greece). *Journal of Hydrology*, 338, 122-131.

Taylor R., 2011, Gossans and Leached Cappings – Fields Assessment. Springer-Verlag, Heidelberg, 165p.

Tchobanoglous G., Theisen H., Vinil S., 1993, Integrated Solid Waste Management. Engineering Principles and Management Issues, Irwin MacGraw-Hill, New York, 978p.

Twardowska I., Allen H.E., Häggblom M.H., 2006, Soil and water pollution: monitoring, protection and remediation. Nato Science Series, Springer, Krakom, 662p.

USEPA – United State Environmental Protection Agency, 1996, A guide for Methane Mitigation Projects: Gas to Energy at Landfills and Open Dumps. USEPA, Washington, DC, USA, 90p.

USEPA – United State Environmental Protection Agency, 1990, Handbook on in situ treatment of hazardous waste-contaminated soils. EPA/540/2-90-W2, USEPA, Ada., 169p.

USEPA – United State Environmental Protection Agency, 1999, Microbial processes affecting monitored natural attenuation of contaminants in the subsurface. EPA/540/S-99/001. USEPA, Ada, 20p.

USEPA – United State Environmental Protection Agency, 1998, Technical Protocol for evaluating natural attenuation of chlorinated solvents in groundwater. EPA/600/R-98/128. USEPA, Washington, 248p.

Valeton I., 1994, Element concentration and formation of ore deposits by weathering. Catena, 21:2, 99–129.

Veloso D.I.K., Moreira C.A., Côrtez A.R.P., 2015, Integration of geoelectrical methods in the diagnostic of a diesel contaminated site in Santa Ernestina (SP). Revista Brasileira de Geofísica, 33:4, 413–420.

Veríssimo C., 1991, Evolução geológica dos corpos de protominério e mineralizações de manganês associadas, porção leste de São Paulo e Sul de Minas Gerais. 89f. Dissertação (Mestrado em Geociências) Universidade Estadual Paulista - UNESP, Rio Claro.

Vieira L.B., Moreira C.A., Côrtes A.R.P., Luvizotto G.L., 2016, Geophysical modeling of the manganese deposit for Induced Polarization method in Itapira (Brazil). *Geofísica Internacional*, 55, 2, 107-117.