

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

**MÉTODOS GEOELÉTRICOS APLICADOS NO ESTUDO DE UMA
OCORRÊNCIA DE MANGANÊS NO MUNICÍPIO DE CAREAÇU - MG**

KARLA XAVIER DE FIGUEIREDO

Orientador: Prof. Dr. César Augusto Moreira

Dissertação de mestrado elaborada
junto ao Programa de Pós-Graduação
em Geociências e Meio Ambiente, para
obtenção do Título de Mestre em
Geociências e Meio Ambiente

Rio Claro (SP)
2014

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

**MÉTODOS GEOELÉTRICOS APLICADOS NO ESTUDO DE UMA
OCORRÊNCIA DE MANGANÊS NO MUNICÍPIO DE CAREAÇU - MG**

KARLA XAVIER DE FIGUEIREDO

Orientador: Prof. Dr. César Augusto Moreira

Dissertação de mestrado elaborada
junto ao Programa de Pós-Graduação
em Geociências e Meio Ambiente, para
obtenção do Título de Mestre em
Geociências e Meio Ambiente

Rio Claro (SP)
2014

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Cesar Augusto Moreira

Prof. Dr. João Carlos Dourado

Prof. Dr. Vagner Roberto Elis

Karla Xavier de Figueiredo

Aluna

Rio Claro, 24 de abril de 2014

"Podem me chamar de louco
Mas aprendi com os mais quebras
A não galopar nas pedras,
Nem pelear por muito pouco

A lição número um
Eu aprendi com meu pai
Quem não sabe pra onde vai,
Não vai a lugar nenhum"

(Jayme Caetano Braun/Luiz Marengo)

Aos meus pais, que sempre acreditaram e me apoiaram.

AGRADECIMENTOS

Começo agradecendo a Deus, pois sem a força que Ele me dá, jamais teria chegado até aqui. Aos meus pais Carlos e Helena, e meus irmãos Igor e Jaques, minha base, minha estrutura. Joana, minha primeira motivação pra vencer. Ao Rafael que tanto me apoiou, desde o início. Com o apoio de vocês sou mais forte, e capaz de realizar todos os meus projetos. Muito obrigada pelos ensinamentos, pelo amor, e principalmente pela paciência durante as crises, nos momentos difíceis do curso, por me ajudarem a suportar a distância e os problemas encontrados durante a minha caminhada aqui. Não tenho palavras pra dizer o quanto amo vocês.

Ao professor Cesar Augusto Moreira, pela orientação recebida, e os ensinamentos por ele transmitidos que foram de enorme importância para a execução deste trabalho, e por ter me ajudado no caminho até a pós graduação. A todos os professores que acompanharam a execução deste trabalho, principalmente os professores João Carlos Dourado e Antonio Celso Oliveira Braga pela boa vontade em auxiliar quando tive dúvidas, e pelas importantes sugestões dadas durante a qualificação, as quais foram incorporadas no trabalho. O apoio de vocês foi realmente essencial.

Aos amigos Dóris Santana e Lenon Ilha pelo apoio que me deram durante o mestrado. Seja corrigindo erros grotescos de português ou ensinando a chegar na rodoviária, sem vocês tudo teria sido mais difícil.

Aos amigos e colegas de pós graduação, pessoas de culturas e cidades diferentes, mas que sempre estiveram dispostos a dar apoio quando necessário, ou um minuto de conversa fiada depois do almoço. Espero encontrá-los sempre!

Não posso deixar de falar aqui da "gauchada da pós". Amigos que fiz ainda durante a graduação, e que aqui tornaram-se minha família: Syngra (e Flavio), Felipe, Camila, Alice, Henrique e Adriano, muito obrigada pelo companheirismo e amizade de sempre! Felipe e Syngra, acho que nada do que eu diga ou faça vai mostrar o quanto eu sou agradecida a vocês pelo apoio no meu campo. Assim que ganhar na mega sena, levo vocês pra comer a pizza aquela de novo!

Agradeço, também, à CAPES pelo apoio financeiro, a seção técnica de pós graduação IGCE / UNESP, A Rosangela pela amizade e por estar sempre disposta a nos ajudar, ao Paco pelo apoio em campo, e sempre que necessário.

Obrigada a todos pelo apoio! E como já disseram, "ninguém vence sozinho"!

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT	10
1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS	11
1.1 Introdução.....	11
1.2 Justificativa.....	12
2 OBJETIVOS	14
3 ÁREA DE ESTUDO	15
3.1 Geologia.....	16
3.1.1 Contexto geológico regional.....	16
3.1.2 Evolução geológica da área.....	17
3.1.3 Geologia local.....	19
4 GEOFÍSICA	23
4.1 Métodos elétricos	23
4.1.1 Método da eletrorresistividade.....	24
4.1.2 Método da Polarização induzida	26
4.1.3 Técnicas e arranjos	28
5 TRABALHOS DE GEOFÍSICA APLICADA A PESQUISA MINERAL	30
6 MATERIAIS E MÉTODOS	32
6.1 Aquisição	32
6.2 Processamento dos dados	34
7 RESULTADOS	35
8 Conclusões	44
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46
APÊNDICE I	49

RESUMO

Esta pesquisa foi realizada com o intuito de fornecer mais informações sobre este tema, diante da escassez de estudos geofísicos aplicados à depósitos de óxidos. Seu objetivo foi avaliar a aplicabilidade dos métodos geofísicos da eletrorresistividade e da polarização induzida no reconhecimento de uma ocorrência mineral composta por óxidos de manganês parcialmente aflorante localizada na região de Careaçú, Minas Gerais. A área foi alvo de pesquisas da CPRM (Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais) no âmbito da Folha Heliadora, para elaboração do relatório do Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil (PLGB). São descritos nessa pesquisa mineralizações de manganês contidas em lentes de gônitos, que estão encaixados em gnaisses e quartzitos. Foram realizadas quatro linhas de caminhamento elétrico, com 240 metros cada, para leituras conjuntas de resistividade elétrica e cargabilidade. Os modelos de inversão 2D sugerem que a média resistividade e alta cargabilidade estavam relacionados com evidências de óxido de manganês disseminado no solo, e que a alta cargabilidade em contraste com a baixa resistividade estava relacionada a ocorrência de minério aflorante.

Palavras-chave: pesquisa mineral, eletrorresistividade; polarização induzida; manganês.

ABSTRACT

This research evaluated the applicability of electrical resistivity and induced polarization geophysical methods in recognizing a mineral occurrence that consists of partially outcropping manganese oxides in Careaçu, Minas Gerais, Brazil. The area has been researched by Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais (CPRM – Company of Research and Mineral Resources) within Heliodora sheet map, in order to draft a report for the Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil (PLGB – Brazilian Basic Geological Surveys Program). In that report are described Manganese mineralizations contained within lenses of gondites, which are embedded in gneisses and quartzites. As there are few geophysical survey applied to oxides, this research was conducted to provide more information about the topic. To do this, four lines of 240 meters each were investigated by the electrical resistivity method. The 2D inversion models indicate that the average resistivity and high chargeability results were related to evidences of manganese oxide disseminated in soil, and the high chargeability and low resistivity results were related to the outcropping mineral occurrence along another line.

Keywords: mineral research, electrical resistivity, induced polarization; manganese.

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS

1.1 Introdução

O setor de recursos minerais sempre esteve em evidência, devido ao elevado crescimento da população, que aumenta a demanda de construções e a busca por elementos que auxiliem a evolução tecnológica. A utilização dos minérios é historicamente conhecida, e o desenvolvimento de técnicas que auxiliam a sua extração, da mesma forma que maximizam a capacidade exploratória e diminuem o impacto no meio ambiente, tem alavancado esse crescimento.

O manganês tem desempenhado um papel fundamental no desenvolvimento dos diversos processos de fabricação do aço, pois é o quarto metal mais utilizado do mundo, depois do ferro, alumínio e cobre, e está presente em nosso dia-a-dia, como no aço utilizado em carros e na construção civil, por isso cerca de 90% de todo manganês consumido anualmente vai para siderúrgicas como elemento de liga (DNPM, 2009).

A demanda por manganês cresceu nos últimos anos impulsionada pela expansão da indústria de aço global. Este crescimento está sendo dirigido pela expansão da indústria de aço chinesa que agora responde por quase 40% de produção de aço mundial, e por conta disso, segundo as empresas responsáveis por sua extração, o comércio mundial de manganês tem previsão de crescimento de aproximadamente 7% ao ano, durante os próximos cinco anos (DNPM, 2009).

O minério de manganês está entre os vinte elementos mais abundantes na crosta terrestre, no entanto, é raro encontrar um depósito do minério, estimativas sugerem que a cada 300 concentrações de manganês apenas uma pode ser considerada como depósito. As reservas brasileiras (medidas + indicadas) no ano de 2003 eram da ordem de 131 milhões de toneladas, contra 587 milhões em 2008, o que importa dizer que houve um incremento de quase 350%, motivado pela reavaliação das reservas existentes no território nacional (DNPM, 2009)

A pesquisa de bens minerais inicia pelo reconhecimento da geologia da área, seja por métodos diretos ou indiretos. Os métodos diretos incluem

reconhecimento de feições e afloramentos em campo, análises geoquímicas, furos de sondagem entre outros métodos que auxiliam na descrição dos litotipos e ainda corroboram para a descrição da gênese do local. Os métodos indiretos complementam os dados diretos, para uma análise em maior escala, com fotos aéreas e os métodos geofísicos que detectam o contraste das propriedades físicas das rochas em subsuperfície (PEREIRA, 2003).

Os métodos geofísicos englobam desde satélites utilizados para varredura de grandes áreas, métodos aéreos que trabalham em escala regional, como aeromagnetometria, aerogravimetria e aerogamaespectrometria, e os métodos terrestres que visam maiores detalhes. Dentre estes métodos, os mais utilizados para pesquisa mineral são os métodos elétricos, eletromagnéticos e magnetométricos. Os métodos elétricos fazem a leitura do potencial elétrico existente na subsuperfície em estudo, seja natural ou induzido por equipamentos geofísicos. Essa leitura permite o entendimento do material contido na área de estudo, através das propriedades elétricas conhecidas na região (PEREIRA, 2003)

A área de estudos está localizada na região nordeste da Folha Heliadora, classificada pelo PLGB (Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil) como ocorrência mineral, em levantamento realizado em 1988. No PLGB constam os mapeamentos de geologia, geofísica, geomorfologia, e geoquímica em folhas 1:50.000 (CPRM, 1988).

1.2 Justificativa

A pesquisa prévia por bibliografias acerca de trabalhos que envolvem métodos elétricos na prospecção de manganês revelou uma ampla escassez de pesquisas nesta área, o que valoriza o presente trabalho e a disponibilização de referencial bibliográfico para auxílio em novos estudos em ocorrências semelhantes.

A utilização dos métodos geofísicos neste estudo deve possibilitar a delimitação de uma das ocorrências de manganês existentes na região. O método da Eletroresistividade permite caracterizar zonas com contraste do parâmetro resistividade elétrica, para o contexto local, é esperada alta resistividade na rocha encaixante, e baixa na mineralização. A Polarização

Induzida indica áreas onde a cargabilidade é mais alta, em contraste com a rocha encaixante, conforme se espera neste estudo.

A seleção por essa ocorrência mineral pressupõe estudos anteriores realizados na área pelo PLGB, previamente revisado, a proximidade da cidade onde está localizada a ocorrência mineral com a universidade, a disponibilidade de equipamentos para realização do estudo e a liberação de acesso a área, concedida previamente pelo proprietário tornam o estudo viável.

2 OBJETIVOS

O principal objetivo dessa pesquisa é avaliar a aplicabilidade dos métodos geofísicos da eletrorresistividade e da polarização induzida no reconhecimento de subsuperfície de uma ocorrência mineral composta por óxidos e hidróxidos de manganês parcialmente aflorante localizada na região de Careaçú, Minas Gerais.

3ÁREA DE ESTUDO

A área de estudos destacada na figura 1 está localizada no município de Careaçú, no sul do estado de Minas Gerais.

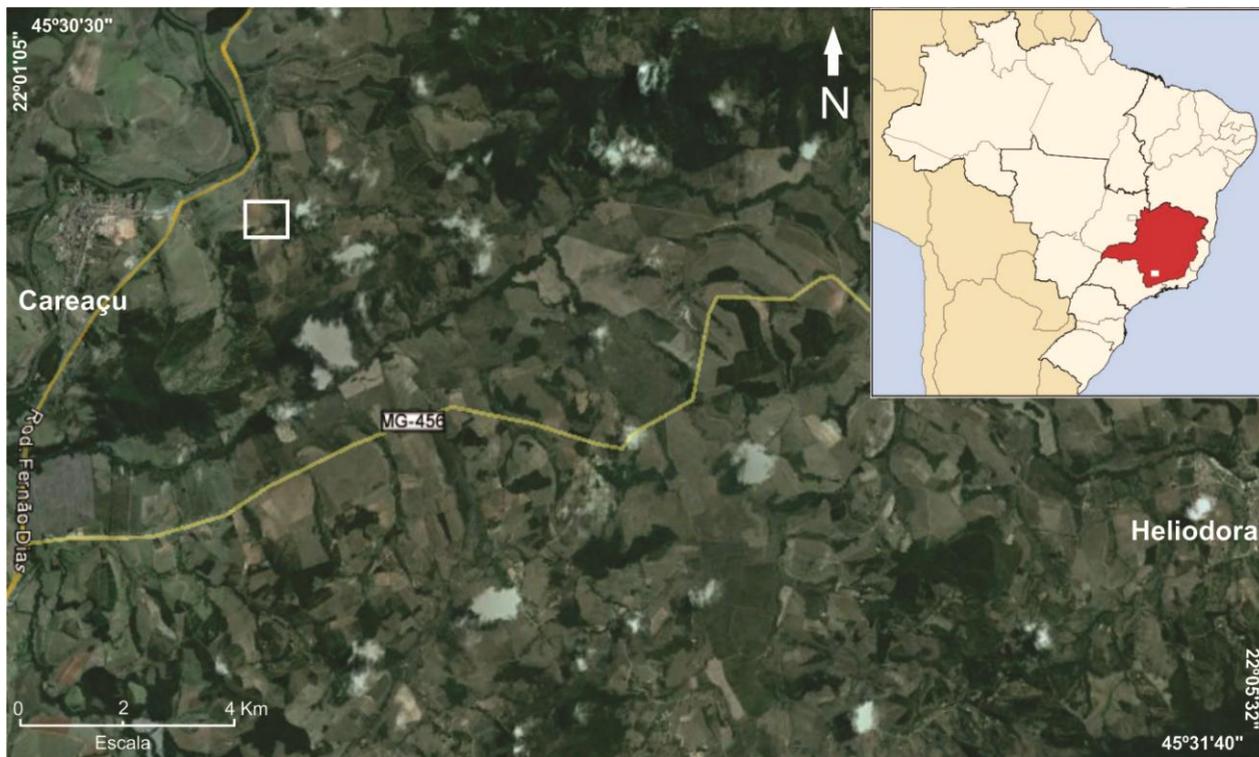


Figura 1 – Mapa de localização com área de estudos em destaque (modificado de *Google Earth*, 2013).

O município de Careaçú está localizado no interior de Minas Gerais, a 354 km da capital Belo Horizonte e a 240 km de São Paulo, às margens do rio Sapucaí, cortado por uma das principais rodovias do Brasil, a Rodovia Fernão Dias (BR 381) (<http://www.careacu.mg.gov.br> – Acesso em janeiro/2013).

A sudoeste da cidade de Careaçú são conhecidas ocorrências de manganês relacionadas, as lentes de gonditos encaixadas em quartzitos, micaxísticos e anfibolitos referíveis ao Grupo Barbacena. Os levantamentos geológicos posteriormente realizados pela CPRM em 1988 descreveram mineralizações de manganês associadas a litotipos representados por quartzitos, xistos diversos, gonditos e biotita gnaisses do Complexo Lambari (VERÍSSIMO, 1991).

3.1 Geologia

3.1.1 Contexto geológico regional

A área de pesquisa está localizada regionalmente sobre a Província Mantiqueira, uma entidade geotectônica instalada a leste dos crátons São Francisco e Rio de La Plata/Paraná, ao final do Neoproterozóico e início do Paleozóico (CPRM, 2003). Dentro deste contexto está situada a Faixa de Dobramentos Alto Rio Grande, que segundo CPRM (1988), está localizada marginalmente ao sul do Cráton do São Francisco (figura 2). Sua forma atual é um trapézio com direção geral WSW-ENE, desde a Bacia do Paraná, a oeste, até a região entre Paranaíba-Barbacena-Juiz de Fora, em uma extensão aflorante de aproximadamente 350 km.

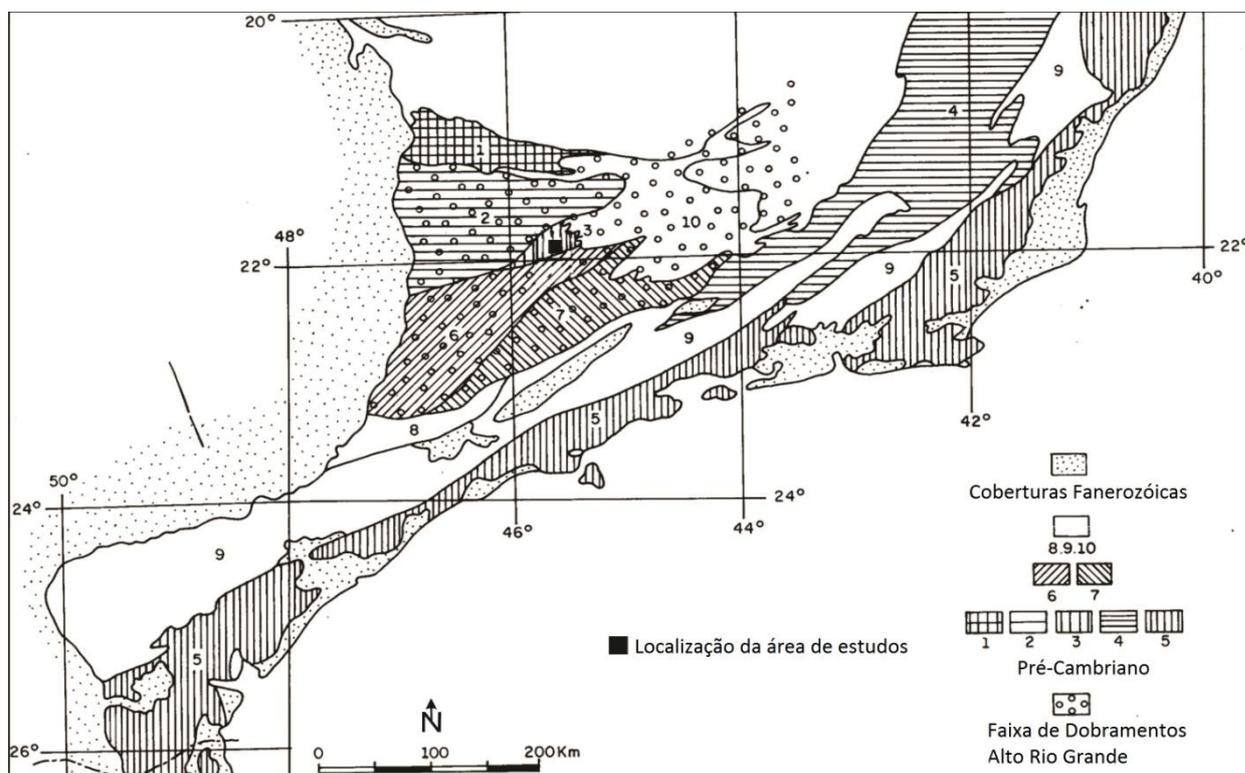


Figura 2: Faixa de Dobramentos Alto Rio Grande dentro da Província Mantiqueira. Distribuição das unidades pré-cambrianas: 1-Complexo Campos Gerais; 2-Complexo Varginha-Guaxupé; 3-Complexo Silvianópolis; 4-Complexo Juiz de Fora; 5-Complexo Costeiro; 6-Grupo Amparo; 7-Complexo Paraisópolis; 8-Grupo São Roque; 9- Grupo Açungui (inclui Complexo Embu e Formação Setuva); 10-Grupos São João del Rei e Andrelândia (Adaptado de CPRM, 1988).

A base maior desse trapézio fica a oeste, possivelmente desde Jundiáí/SP ao sul, até Monte Santo/MG ao norte, com aproximadamente 220

km. Nesse trecho engloba a região do platô de Poços de Caldas e as litologias dos complexos graníticos e granulíticos do Maciço de Guaxupé. A leste termina em faixas protegidas por falhas tardias, envolvendo conjuntos de rochas graníticas e granito-*greenstone* do Complexo Barbacena, orto e paragnaisses da serra da Mantiqueira e granulitos do Complexo Juiz de Fora, ocupando uma largura máxima de 110 km.

Seu limite sul coincide com a Zona de Cisalhamento Serra da Mantiqueira, e ao norte com a Zona de Cisalhamento Campo do Meio. Sua forma atual é derivada dos últimos eventos deformacionais que a atingiram, possivelmente de idade tardi-uruaçuana ou brasileira precoce.

A citada faixa de dobramentos tem como característica básica seu policiclismo e o envolvimento, em seus vários eventos tectono-metamórficas, tanto nas seqüências supra crustais próprias da faixa, bem como de seu embasamento arqueano (CPRM, 1988).

3.1.2 Evolução geológica da área

Segundo (CPRM, 1988), a infraestrutura dessa faixa foi provavelmente consolidada na sua forma atual, durante o ciclo Tectonotermal Jequié – 2500 Ma \pm 100, embora alguns conjuntos líticos que a contrapõem tenham história crustal mais antiga. O quadro que resulta desse tectonismo é a justaposição dos níveis crustais inferiores (Complexo Varginha-Guaxupé, Complexo Juiz de Fora, Complexo Paraisópolis pró-parte), a níveis crustais intermediários e superiores (Complexo Barbacena, Complexo Campos Gerais), através de uma importante continuidade gravimétrica que aponta para um espessamento crustal ao longo do atual curso médio do Rio Grande, com o bloco meridional (blocos São Paulo e Vitória) cavalgando sobre o bloco setentrional (Bloco Brasília).

Os estudos efetuados, principalmente sobre rochas do Complexo Silvanópolis, mostraram que estes constitui-se de rochas de uma série granítica desde os termos mais básicos (tonalitos) até os mais ácidos (granitos), de filiação calcialcalina, hiperstenítica a pigeonítica, sincolisional, tipo arco vulcânico.

Cortando essas seqüências, foram descritos granodioritos porfíricos (augen gnaisses), calcioalcalinos e, como eventos graníticos terminais, foram definidos granitos alcalinos leucocráticos, tardi a pós-colisionais.

Esse processo de colisão continental, no limite dos eons Arqueano e Proterozóico, deu condições para a formação de uma bacia marginal, provavelmente ensiática, talvez do tipo *back-arc* (arco-interno); esta se iniciou com a sedimentação na margem do arco formado de sedimentos terrígenos finos, com raros níveis psamíticos, intercalados com material vulcanoclástico e possíveis derrames e intrusões máficas e ultramáficas (Complexo Lambari) que passam no sentido da porção mais profunda da bacia (NE), para os *graywackes*, de composição global tonalítica (anômalas em Cr, Ni, B, V), denotando a área fonte da Formação Cambuquira do Grupo Andrelândia.

Essa bacia ao ser preenchida e em regime de quiescência tectônica deu origem a sedimentação pelito-psamítica superior do Grupo Andrelândia. Essa bacia, ao ser preenchida e em regime de quiescência tectônica, deu origem a sedimentação pelito-psamítica superior do Grupo Andrelândia (Formação São Tomé das Letras, Quartzito Ibitipoca e Gnaisses Brejão). Essa sedimentação extravasou do fulcro principal da bacia para norte e nordeste, em direção do Cráton do Paramirim (Formação São Tomé das Letras e Gnaisses Brejão) e para sul e sudeste sobre as partes aplainadas do arco vulcânico (Quartzito Ibitipoca).

A sedimentação extravasada para norte muda de fácies á borda do Clapton, enriquecida de sedimentos carbonáticos, margas e calcários (Formação Rio Elvas) e paraconglomerados polimíticos (Formação Carandai, “Sequências” de Madre de Deus de Minas) do Grupo São João del Rei (CPRM, 1988).

Todo esse conjunto foi então submetido a uma tectônica tangencial em regime de cisalhamento dúctil de baixo ângulo, com desenvolvimento de uma intensa foliação plano-axial de transposição (St), que também transpõe o bandamento metamórfico (St-I) da infraestrutura resultante do *thrustbelt* desenvolvido no prosseguimento da colisão, empurrando seqüência de arco interno sobre o continente.

A região de Careagu se encontra dentro do domínio morfoestrutural denominado Planalto Sul de Minas (ou Alto do Rio Grande), parte integrante da

unidade maior reconhecida como Planalto Atlântico do Brasil Sudeste. As maiores expressões e elevações locais ocorrem no extremo SW da área, associadas a “augen gnaisses” mostrando mergulhos fortes e verticalizados e orientação marcadamente NE-SW (Verissimo,1991).

A drenagem que entalha a área é formada por afluentes de margem direita do rio Sapucaí, onde se destaca o Rio Turvo, com padrão marcadamente retangular mostrado pelo condicionamento do leito do rio ao longo dos planos da zona de falha de Ouro Fino, formando alto ângulo com tributários provenientes da dissecação da Serra das Águas a Oeste.

3.1.3 Geologia local

As unidades litológicas a seguir foram descritas pela CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais) no relatório do PLGB (Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil) da folha Heliodora no ano de 1988, e estão inseridas no contexto regional da área de estudos(Figura 3).

O Complexo Lambari ($PII_{B(qt)}$) é caracterizado por uma sequencia de gnaisses laminados a bandados com frequentes intercalações de anfibolitos, quartzitos, granada-mica-xistos e calcissilicáticas subordinadas. Os gnaisses que constituem a litologia dominante tem como mafico principal a biotita seguida de hornblenda e apresentam estrutura laminada a bandada com niveis centimetricos a metricos formados predominantemente de quartzo e feldspato, de biotita, de anfibolio, e biotita e de anfibolio, alternadamente (CPRM, 1988).

A foliação gnaissica é resultante de transposição por cisalhamento ductil e é concordante com a laminação/bandamento; esses gnaisses mostram-se em geral milonitizados, mormente proximo a zonas de contato tectonico com as unidades litologicas limitrofes, onde exibem laminação milimetrica notavel e ate adquirem aspecto xistoso, com granulação fina, estiramento dos félsicos com frequentes discoides de quartzo, de cristais de feldspatos e/ou agregados quartzo-feldspaticos, alem de aparecimento com forma ocelar de granada vermelha, fina, disseminada; muscovita/sericita também aparece nessas zonas.

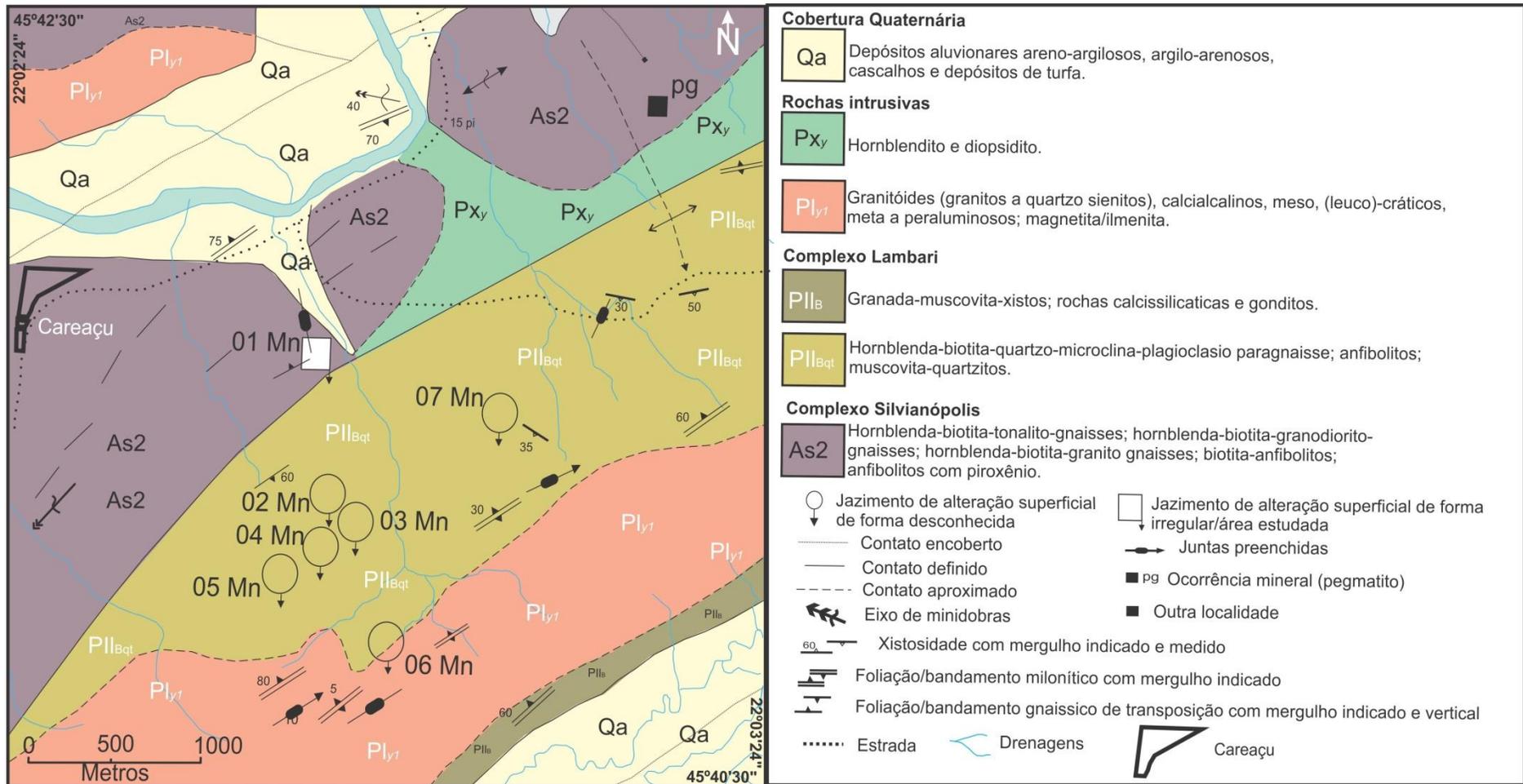


Figura 3: Mapa geológico da área de estudos (modificado de CPRM, 1988).

Outra grande área de ocorrência de rochas quartzíticas relacionadas à unidade foi cartografada no extremo sudoeste da Folha Heliodora, onde as mesmas sustentam os contrafortes da serra de Santa Rita. São quartzitos muscovíticos, granatíferos em alguns locais, bastante feldspáticos, por vezes laminados, em contato tectônico com augens-orto-gnaisses intrusivos e gnaisses tonalíticos do Complexo Silvianópolis, da mesma maneira como acontece na região de Careçu, não tendo sido observada, entretanto, as ocorrências de gnditos registrados naquele local (CPRM, 1988).

As rochas dessa unidade estão na fácies anfíbolito, conforme evidenciado pela paragênese mineral formada de plagioclásio cálcico, hornblenda, granada, cianita e sillimanita.

O retrometamorfismo é evidenciado pela cloritização dos minerais máficos. Sob a denominação de unidade 2 do Complexo Silvianópolis (As2), estão incluídos gnaisses tonalíticos a granodioríticos e tipos similares, porém de composição granítica (CPRM, 1988).

Esses gnaisses contêm bandas oftalmíticas e intercalações freqüentes de anfíbolitos, granitos, pegmatitos e, mais raramente, de metabasitos. Os (hornblenda)-biotita-tonalito-gnaisses e os (hornblenda)-biotita-granodiorito-gnaisses são de cor cinza, granulação, em geral, média e estrutura laminada dominante, com alternância de níveis máficos e félsicos de espessura centimétrica (CPRM, 1988).

Segundo Veríssimo (1991), os protominérios calciossilicáticos ocorrem como lentes de pequena espessura intercaladas nos xistos, nunca ultrapassando algumas dezenas de metros de extensão. São rochas de granulação média, acinzentadas, alterando níveis mais claros e escuros, caracterizando uma estrutura bandada, com bandas que variam desde milimétricas até 1 cm exibindo concentrações variadas de máficos (clinopiroxênio), granada e quartzo.

Quando alteradas apresentam tons amarelo-ocre e esverdeado e liberam quantidades significativas de manganês, principalmente ao longo das faixas mais enriquecidas em granadas, gerando um minério com textura bandada característica, que pode apresentar localmente teores elevados de manganês.

Um exemplo pode ser visto em estrada vicinal, entre as fazendas Pedra Preta e Santo Antônio, a cerca de 2 km da rodovia Fernão Dias, onde foi tentativamente iniciada uma lavra rudimentar deste minério e interrompida por questões de viabilidade econômica (VERISSIMO, 1991).

A seguir, imagens de amostras coletadas e rochas existentes na área de estudos. Apesar de haver poucos afloramentos, é visível a presença de minérios de manganês. Na figura 4A e 4B representa a rocha encaixante, descrita como quartzo mica xisto creme, com foliação bem marcada e níveis quartzíticos. Em C e D, rochas aflorantes, com minério alterado (figura 5).



Figura 4: em A e B amostras da rocha encaixante representada por quartzo mica xisto de cor creme, com foliação bem marcada.



Figura 5: em C e D, rochas aflorantes alteradas, com minério visível em superfície.

4 GEOFÍSICA

Os métodos geofísicos utilizam os contrastes existentes entre as propriedades físicas das rochas para mapear a região de estudos, e com a interpretação desses registros, obter uma indicação da localização dos corpos mineralizados. Ela é utilizada principalmente na prospecção de petróleo e gás natural, localizando as rochas reservatório que normalmente estão em profundidade e são dificilmente localizadas através de levantamentos geológicos. É também muito utilizada na prospecção de minerais que apresentam características físicas diferentes das rochas encaixantes, tais como densidade, elasticidade, magnetismo, condutividade e resistividade elétrica e radioatividade (TELFORD *et al*, 1990).

Os métodos geofísicos mais utilizados na prospecção mineral são: magnetométrico, gravimétrico, eletrorresistividade, polarização induzida, potencial espontâneo, eletromagnético, gamaespectrométrico entre outros. A escolha do melhor método a ser aplicado deve ser feita através da comparação de custos, eficiência, alcance em profundidade em função do objetivo que se pretende alcançar (KEAREY *et al*, 2002).

Neste estudo foram utilizados os métodos da eletrorresistividade e polarização induzida devido aos contrastes de propriedades físicas existentes na geologia do local.

4.1 Métodos elétricos

Os métodos elétricos utilizam correntes diretas ou alternadas de baixa frequência para investigar as propriedades elétricas de subsuperfície. Alguns usam fontes de corrente naturais (presentes nas rochas do meio), outros utilizam fontes artificiais de geração de corrente elétrica para leitura de resistividade, cargabilidade ou polarização (KEAREY *et al*, 2002).

Metais e sulfetos metálicos são grandes condutores de eletricidade pela forma de fluxo de elétrons, por isso, os métodos elétricos são importantes em investigações minerais, onde os objetos metálicos são muitas vezes os alvos, como na busca de minérios de sulfeto. A maioria dos minerais que formam as

rochas são resistivas, e ocorre condução por íons nas águas dos poros dessas rochas (MILSON, 2003).

4.1.1 Método da eletrorresistividade

O método da eletrorresistividade emprega uma fonte artificial de corrente, que é introduzida no solo por meio de eletrodos (denominados A e B), e a diferença de potencial medida por outro par de eletrodos (M e N). Como a corrente é medida também, é possível determinar uma resistividade efetiva ou aparente do subsolo (figura 6) (TELFORD *et al*, 1990).

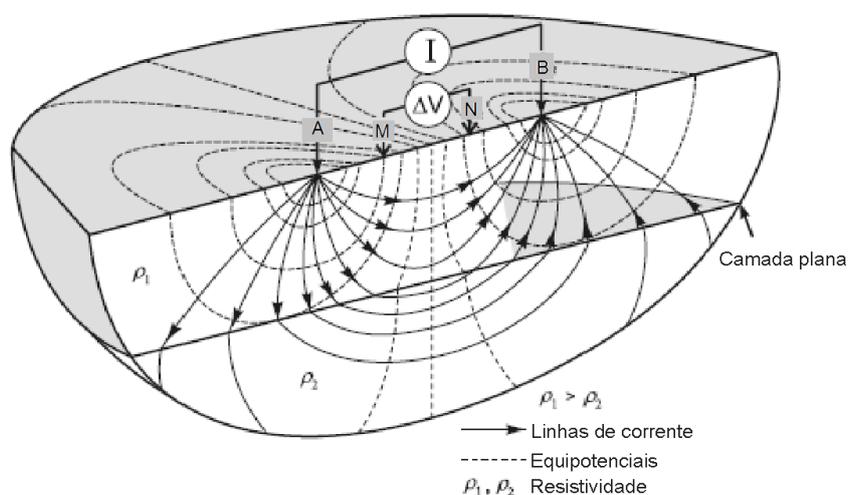


Figura 6 – Propagação de campo elétrico em meio tridimensional, por meio de um dispositivo de quatro eletrodos (KNODEL, 2007).

A corrente que flui num condutor é proporcional à voltagem que passa por ele, isto é,

$$V = IR, \quad (\text{Eq. 1})$$

A constante de proporcionalidade, R, é conhecida como a resistência e é medida em Ohms quando a corrente (I) está em amperes e tensão (V) é em volts. (MILSON, 2003).

A resistividade de um material é a propriedade física que determina a facilidade com que correntes elétricas passam através deste. Estudos sobre condutores diferentes do mesmo material mostraram que um condutor longo tem uma resistência maior do que um fio de curto, e um condutor fino tem uma maior resistência que um fio grosso, assim pode-se concluir que a

resistividade de determinado material é proporcional ao comprimento L e inversamente proporcional à área transversal A deste condutor. Considerando um cilindro condutor de resistência R, comprimento L e área de seção transversal A, a resistividade pode ser dada por (LOWRIE, 2007):

$$\rho = \frac{RA}{L} \quad (\text{Eq. 2}).$$

Devido à heterogeneidade do meio geológico as medidas de resistividade obtidas em um levantamento são uma média de todas as resistividades presentes no meio, chamada *resistividade aparente* e pode ser calculada conhecendo a intensidade de corrente (I) introduzida pelos eletrodos A e B, a diferença de potencial (ΔV) medida pelos eletrodos receptores M e N, e o fator geométrico (K): (KEAREY *et al*, 2002).

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I}, \quad (\text{Eq.3})$$

onde K pode ser calculado da forma:

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} + \frac{1}{BM} + \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \quad (\text{Eq. 4})$$

A resistividade do solo e das rochas é afetada principalmente por quatro fatores: composição mineralógica, porosidade, saturação e teor de sais dissolvidos no líquido intersticial. Dentre esses fatores, os mais importantes são, sem dúvida, a quantidade de água contida e a salinidade dessa água. O aumento nesses valores leva a uma diminuição da resistividade.

Certos minerais, como metais nativos e grafite, presentes na matriz da rocha, conduzem eletricidade por meio da passagem de elétrons, o que é denominado condutividade eletrônica. Já para os minerais isolantes, que são a maioria dos formadores das rochas, a corrente elétrica é conduzida através do deslocamento de íons dissolvidos na água contida nos poros e fissuras, o que é denominado condutividade eletrolítica.

Assim, a condutividade elétrica nas rochas é conduzida na sua maior parte por processos eletrolíticos mais do que processos eletrônicos, pois apenas em casos específicos os minerais condutores ocorrem nas rochas em quantidade suficiente para aumentar sua condutividade global. Portanto, a

porosidade é o principal controle da resistividade de rochas e a resistividade geralmente aumenta com a diminuição da porosidade(KEAREY *et al.*, 2002).

A condutividade em rochas sedimentares ocorre devido a sua porosidade ser geralmente intergranular, consistindo de vazios ainda remanescentes do processo de compactação. Em rochas ígneas a porosidade da própria rocha é extremamente pequena, no entanto as moléculas de água podem circular através de pequenas fraturas na rocha que são resultado da ruptura mecânica. Estas fraturas são chamados juntas e podem ser suficientemente grandes e / ou numerosos para que a sua presença modifique a condutividade elétrica da rocha. Essas juntas também desempenham um papel importante na condutividade das rochas sedimentares mais impermeáveis (McNEILL, 1980).

Quando grandes juntas estão presentes a condutividade local deverá variar fortemente.

Uma terceira forma de porosidade existente que também contribui para variação da condutividade é a porosidade secundária, mais comum em rochas calcárias. É constituída por pequenos poros interligados que armazenam líquidos e podem tornar a rocha mais condutiva (McNEILL, 1980).

4.1.2 Método da Polarização induzida

Com um arranjo com quatro eletrodos, no modo de envio de corrente contínua, após a corrente que está sendo injetada ser abruptamente interrompida, a voltagem entre os eletrodos de potencial não cai a zero imediatamente. Após decrescer inicialmente mais rápido, a voltagem começa a decair de forma gradual até chegar a zero (figura 7).

Acontece da mesma forma quando a corrente é injetada novamente, após um aumento repentino a voltagem passa a aumentar gradualmente até chegar a um valor estável. Esse fenômeno acontece devido ao terreno agir como um capacitor, armazenando carga elétrica e se tornando eletricamente polarizado(KEAREY *et al.*, 2002).

A curva de decaimento mostrada na figura 5 representa o retorno ao estado original após à corrente aplicada, durante o tempo de injeção de corrente, provavelmente houve armazenamento de energia no material. Este

armazenamento de energia é o resultado das variações na mobilidade de íons em fluidos ao longo da estrutura da rocha ou variações de condutividade iônica e eletrônica, devido à presença de minerais metálicos.

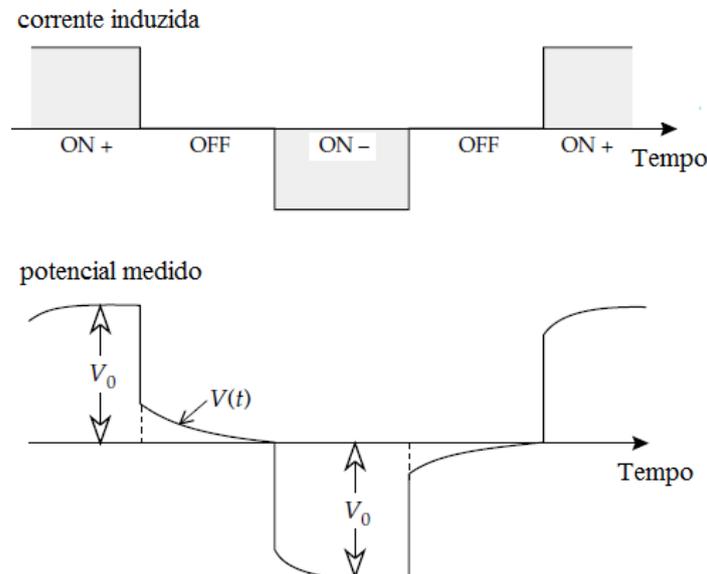


Figura 7: forma como a corrente é injetada e abruptamente interrompida e a resposta em gráfico do potencial medido (modificado de LOWRIE, 2007).

O primeiro destes efeitos é conhecido como polarização de membrana ou polarização eletrolítica e constitui o efeito de fundo ou o chamado efeito IP e pode ocorrer em rochas que não contêm minerais metálicos. O segundo é conhecido como polarização metálica ou eletrônica. Em geral é de maior magnitude que o efeito IP e depende da presença de minerais metálicos na rocha. Os dois efeitos são indistinguíveis por medição IP (TELFORD *et al*, 1990).

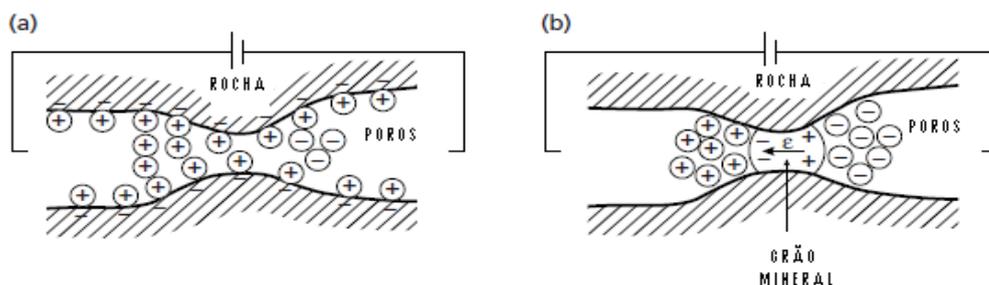


Figura 8 – Mecanismos de polarização induzida. (a) polarização de membrana (b) polarização metálica ou eletrônica (KEAREY *et al.*, 2002).

As medições IP no domínio do tempo envolvem o monitoramento do decaimento da voltagem após a corrente ser desligada. O parâmetro mais comumente medido é a cargabilidade M , definida como a área A sob a curva de decaimento durante um intervalo de tempo t_1 - t_2 normalizado pela diferença de potencial no estado estacionário ΔV_c (KEAREY *et al*, 2002).

$$M = \frac{1}{\Delta V_c} \int_{t_1}^{t_2} V(t) dt \quad (\text{Eq. 5})$$

4.1.3 Técnicas e arranjos

A técnica de caminhamento elétrico permite obter a variação lateral de resistividade e cargabilidade em profundidades constantes, primeiro o espaçamento entre eletrodos é mantido constante, e o caminhamento é iniciado ao longo de perfis efetuando as medidas de resistividade aparente. O procedimento de campo consiste em manter constante o arranjo entre os eletrodos e medir os parâmetros físicos envolvidos no ensaio.

Esse método é empregado em prospecção mineral para localizar falhas ou zonas de cisalhamento e para detectar corpos localizados de condutividade anômala. É também usado em levantamentos geotécnicos para determinar variações na profundidade do embasamento e a presença de descontinuidades abruptas (KEAREY *et al*, 2002).

O arranjo Wenner (figura 9) utiliza quatro eletrodos dispostos em linha com espaçamento constante entre dipolos, sendo um par eletrodos de corrente e o outro de potencial. A principal vantagem deste arranjo é a elevada razão sinal/ruído que o mesmo proporciona ao mesmo que uma das principais desvantagens é a perda rápida da cobertura em profundidade, assim sendo, à medida em que aumenta o espaçamento entre os eletrodos a cobertura horizontal em subsuperfície diminui (GANDOLFO, 2007).

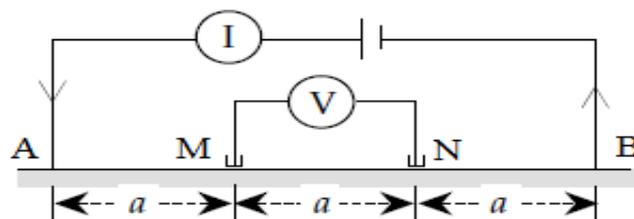


Figura 9: Configuração do Arranjo Wenner (adaptado de KEAREY *et al*, 2002).

O arranjo Schlumberger (figura 10) é um arranjo simétrico, em relação ao centro, com eletrodos de corrente nos extremos e potencial no centro, é um arranjo ideal para identificação de camadas horizontais, ou seja, apresenta boa resolução vertical (TELFORD, 1990).

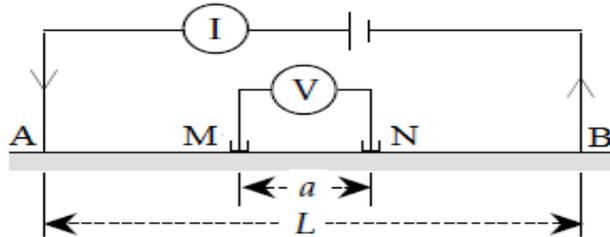


Figura 10: Configuração do Arranjo Schlumberger (adaptado de KEAREY *et al*, 2002).

O arranjo Wenner-Schlumberger é um híbrido entre os arranjos Wenner e Schulmberger, modificado para que os eletrodos de corrente e de potencial estejam dispostos em campo com espaçamento constante. O primeiro nível de leitura é realizada com o arranjo Wenner, e após os eletrodos de potencial são afastados dos eletrodos de corrente, sob o mesmo espaçamento entre si, caracterizando a aquisição com o arranjo Schlumberger. Esse tipo de leitura tem uma cobertura horizontal em subsuperfície, e identifica os variados tipos de estruturas (LOKE & BARKER, 1996).

5 TRABALHOS DE GEOFÍSICA APLICADA A PESQUISA MINERAL

A pesquisa prévia por bibliografias acerca de trabalhos que envolvem métodos elétricos na prospecção de manganês revelou uma ampla escassez de pesquisas nesta área. Os estudos aqui apresentados foram selecionados devido à semelhança de resultados obtidos.

O trabalho de Ramazi (2013) integrou os métodos de polarização induzida (IP), eletrorresistividade e potencial espontâneo (SP) para a exploração e avaliação de um depósito de manganês em Marand (Irã). A área é composta geologicamente de tufo e piroclastos no sudoeste e oeste, arenito com margas no oeste, margas ferro-gipsíticas no centro, conglomerados moderadamente consolidados com seixos vulcânicos no norte, e calcário no Nordeste. Corpos minerais (principalmente sulfetos) ocorrem como veios e diques.

O método da polarização induzida provou sua acurácia na separação de camadas de manganês entre camadas de calcário. A maioria dos resultados de eletrorresistividade estão em concordância com os resultados de IP, mas em alguns casos existem diferenças devido a dependência de outros fatores que podem estar relacionados com a presença de piroclastos que têm baixa resistividade e ocorrem entre as camadas da rocha calcária que não têm manganês e os seus valores de IP são baixos.

O estudo de Talabi (2013) utilizou o método da eletrorresistividade com a técnica de sondagem elétrica vertical (SEV) na tentativa de determinar a profundidade e a extensão da área provável do depósito de bauxita em Orin-Ekiti - Nigéria. Foram realizados nove SEVs na área e coletadas aleatoriamente sete amostras que foram analisados para Al_2O_3 , por um espectrômetro de absorção atômica (AAS). Os principais afloramentos rochosos são migmatitos e charnockitos especialmente de granulação grossa. Geralmente, o terreno é acidentado com afloramentos de charnockito em alguns locais.

A técnica de sondagem elétrica vertical mostrou uma litologia bastante homogênea, bem como a camada de interesse que tem valor de espessura entre 7,0 m – 16,3 m, suficiente para o depósito de bauxita ser considerado econômico. Além disso, a análise química preliminar indicou que o depósito é de alta qualidade e pode ser considerado para futura exploração.

No estudo de Murthy et al (2009) levantamentos geofísicos de gravimetria, resistividade magnética e elétrica foram realizados em alguns blocos selecionados no cinturão de Jamda-Koira de Keonjhar District, Orissa (Índia). O minério de manganês, principalmente psilomelana e pirolusita ocorre nesta faixa como pequenas lentes descontínuas e, em geral, sob a laterita. Estas ocorrências de minério parecem limitar-se próximo a NW-SE ou NS e os cintos são associado a folhelhos/xistos.

A dimensão da ocorrência de manganês em uma das áreas possibilitou a escolhados parâmetros de levantamento, os perfis de resistividade elétrica foi utilizado espaçamento entre eletrodos $AB/2 = 10\text{m}$ e 30m , sondagens com $AB / 2$ até 90m , e as medidas de gravimetria foram tomadas em polígonos ao longo de cada bloco. No primeiro bloco, o levantamento geofísico foi realizado, e revelou tendências e alinhamentos dos corpos de minério e as falhas e fraturas associadas a concentrações de ferro. Nos dois outros blocos, o levantamento mostrou bolsões relacionados à provável ocorrência de minério de manganês.

Moreira et al (2012b), realizou levantamentos geofísicos de eletrorresistividade e polarização induzida na região de Itapira, São Paulo (Brasil). Predominam protominerais de silicatos que ocorrem em paragnaises e quartzito espessartita, sob a forma de lentes alinhadas em direção NE. Os gnaisses têm faixas leucocráticas de quartzo feldspático com fraturas preenchidas com óxidos e hidróxidos de manganês de granulação grossa. O minério de manganês de origem supergênica, está disseminado no intervalo de solo e saprolito, além de estar estruturalmente controlado em profundidade, em xistos e gnaisses.

O levantamento de eletrorresistividade e polarização induzida foi realizado com arrajo dipolo-dipolo, em quatro linhas de 75 metros cada, em 8 níveis de profundidade. A zona mineralizada foi caracterizado por valores baixos de resistividade (20 Ohm.m) e altos valores de cargabilidade (30ms), em um padrão semelhante ao descrito em vários trabalhos em depósitos de óxido e sulfetos. As áreas de alta cargabilidade e baixa resistividade foram definidas como padrão de mineralização gondítica com altos níveis de manganês. A presença de áreas com alta valores de cargabilidade e baixos de resistividade, estão associados a prováveis acumulações de hidróxido de manganês e ferro, provenientes do intemperismo de corpos gondíticos.

6 MATERIAIS E MÉTODOS

6.1 Aquisição

Foram realizadas medidas de resistividade elétrica e polarização induzida por meio da técnica de caminhamento elétrico, com arranjo Wenner-Schlumberger, com espaçamento de 10 m entre os eletrodos e 10 níveis de investigação, num total de 4 linhas com comprimento individual de 240m (Figura 11).



Figura 11: Disposição das linhas em campo.

Para realizar as medidas foi utilizado o resistivímetro Terrameter SAS4000, fabricado pela empresa sueca ABEM (Figura 12). O equipamento pode realizar medidas de resistência elétrica, polarização induzida e potencial espontâneo, este último não utilizado neste estudo. A configuração do equipamento, utilizada na aquisição foi de corrente injetada de 50mA, tempo de leitura de 1s, janela única de leitura de 100ms e tempo de decaimento de 10ms.



Figura 12: Resistivímetro Terrameter SAS 4000 efetuando medidas em campo.

Para realização das medidas, foram utilizados eletrodos não polarizáveis, a base de uma solução de sulfato de cobre supersaturada (Cu-CuSO_4), para não haver risco de medidas mascaradas pelo uso de eletrodos metálicos. Primeiramente são perfurados os pontos de fixação dos eletrodos com o auxílio de uma haste metálica (figura 13 A), e então fixada os eletrodos de leitura com base porosa (figura 13 B) preenchidos pela solução supersaturada de sulfato de cobre (figura 13C) e conectado o cabo de leitura (figura 13 D).



Figura 13: Fases de fixação dos eletrodos.

A seguir, a leitura é realizada e anotada em planilhas e posteriormente digitadas no *software* para processamento.

6.2 Processamento dos dados

Os dados adquiridos foram tabelados em um editor de planilhas, juntamente com as coordenadas geográficas e altitude em cada ponto.

O programa RES2DINV, da *Geotomo Software* determina um modelo bidimensional da subsuperfície a partir dos dados obtidos no caminhamento elétrico. Foi desenvolvido para interpolar grandes conjuntos de dados. O modelo 2D usado pelo programa de inversão consiste em uma série de blocos retangulares, a disposição dos blocos é ligado à distribuição dos pontos dos dados na pseudo-seção.

A distribuição e tamanho dos blocos são gerados automaticamente pelo programa conforme a distribuição dos pontos de dados. A profundidade da linha inferior dos blocos é definida para ser aproximadamente igual à profundidade equivalente de investigação dos pontos de dados com o maior espaçamento entre eletrodos (EDWARDS, 1977).

A sub-rotina de modelagem direta é usada para calcular os valores de resistividade aparente, onde uma técnica de otimização não linear por mínimos quadrados é usada para a rotina de inversão (DEGROOT-HEDLIN & CONSTABLE 1990, LOKE & BARKER, 1996). O resultado é apresentado sob a forma de seção com distância versus profundidade, em termos de pseudo-seção, seção calculada e modelo de inversão como mostrados no apêndice I.

7 RESULTADOS

Os dados são apresentados em modelos de inversão 2D para resistividade e cargabilidade, com topografia ajustada e escala padronizada de cores e valores em todas as seções. Os modelos de inversão de resistividade para as 4 linhas efetuadas, apresentam valores que variam entre 37,8 Ohm.m e 38.211 Ohm.m (figura 14).

A linha 1 apresenta valores de resistividade que variam, nos primeiros 10 metros de profundidade, entre 37,8 Ohm.m a aproximadamente 700 Ohm.m, nos próximos 10 metros a variação é entre 733 Ohm.m a 13.000 Ohm.m, e nos últimos 20 m de profundidade, a resistividade chega valores mais altos, chegando a 38.211 Ohm.m. Essa ampla variação pode estar relacionada à presença de solo nos primeiros metros de profundidade e a rocha inalterada em subsuperfície. Conforme evidências encontradas em campo, o solo abaixo da linha 1 pode estar impregnado de óxido de manganês, gerando os menores valores de resistividade calculados.

Na linha 2, existe uma variação de valores de resistividade que variam entre 37,8 Ohm.m e 273 Ohm.m, entre as posições 110 m e 180 m, desde a superfície até aproximadamente 30 m abaixo, e valores entre 5.293 Ohm.m e 14.000 Ohm.m, em regiões entre 10 m e 40 metros de profundidade. Essa variação, em termos relativamente baixos se comparados com a linha 1, pode estar relacionada à presença do óxido de manganês encontrado nas rochas existentes na extensão e entorno da linha, o que sugere a existência de um corpo mineralizado em subsuperfície.

Na linha 3, os valores mínimos de resistividade vão de 37,8 Ohm.m a 270 Ohm.m nos primeiros metros, mas a partir dos 10 metros de profundidade, a resistividade chega a valores acima de 14.000 Ohm.m. Esse contraste de valores, quando comparados à linha 2, pode indicar que a mineralização não tem continuidade lateral. Os valores baixos de resistividade podem estar relacionados ao solo em superfície.

Na linha 4, os valores mais baixos também estão na faixa de 37,8 Ohm.m a 270 Ohm.m nos primeiros metros, mas logo nos próximos metros (a partir de 5 metros de profundidade) os valores de resistividade aumentam consideravelmente até mais de 38.000 Ohm.m.

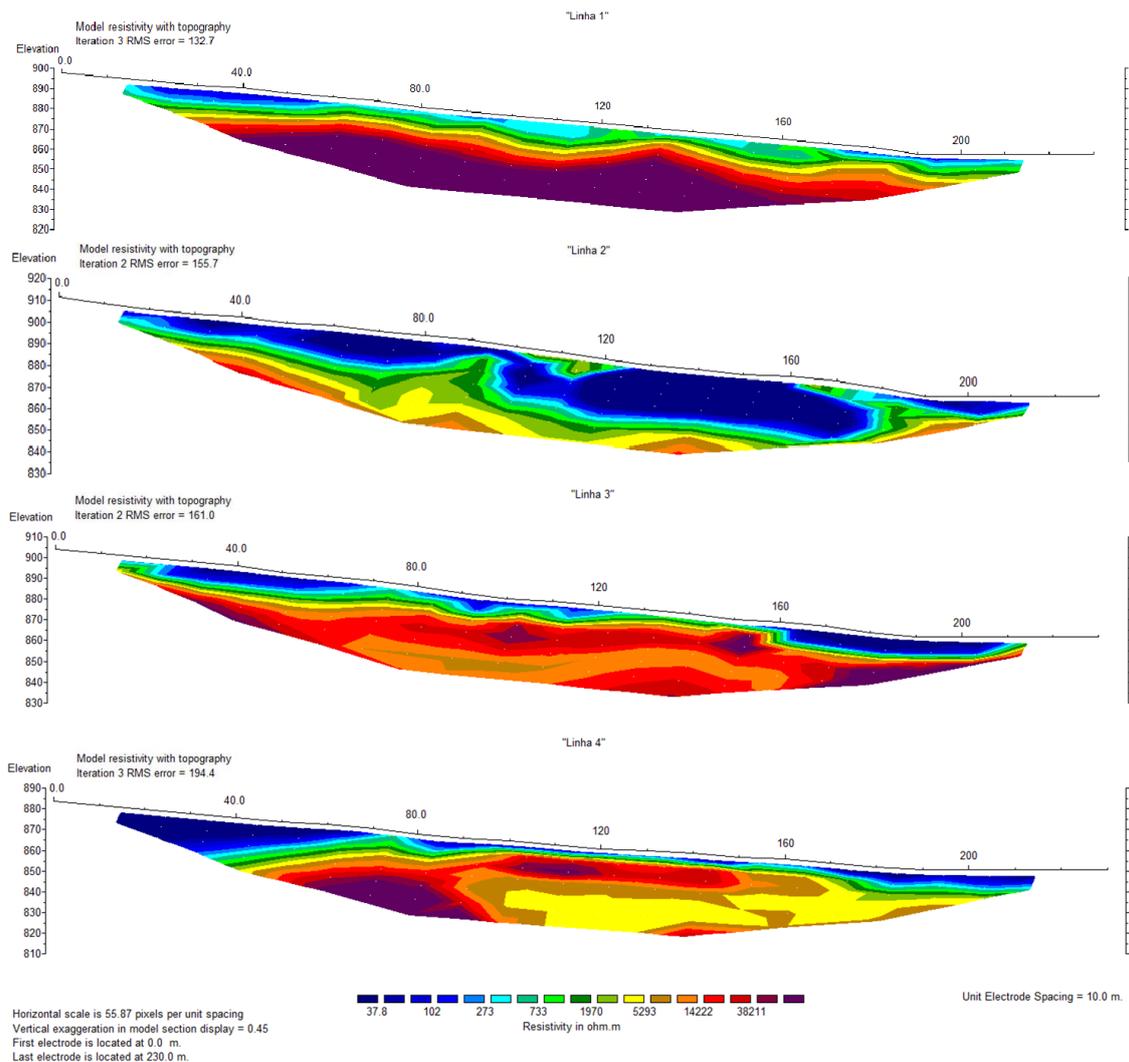


Figura 14: seções de resistividade para as 4 linhas de caminhamento elétrico.

Esses valores mais altos podem estar relacionados às rochas descritas no local, como quartzitos, xistos diversos e biotita gnaisses, conforme PLGB (CPRM, 1988) (figura 3), e descrito por Veríssimo (1991).

O empilhamento das seções de cargabilidade mostrou uma variação de valores entre 0,040 ms a 186 ms, que podem estar relacionados, à presença do minério aflorante nas regiões com cargabilidade mais alta, ou nas regiões de baixa cargabilidade a rocha encaixante (figura 15).

A linha 1 apresenta cargabilidade em torno de 55 ms, com valores mais baixos, em torno de 16,4 ms a partir dos 10 m de profundidade, entre as posições 70 m e 130 m. Essa média relativamente baixa de cargabilidade, pode estar relacionada à possibilidade do solo em subsuperfície conter hidróxidos em sua composição.

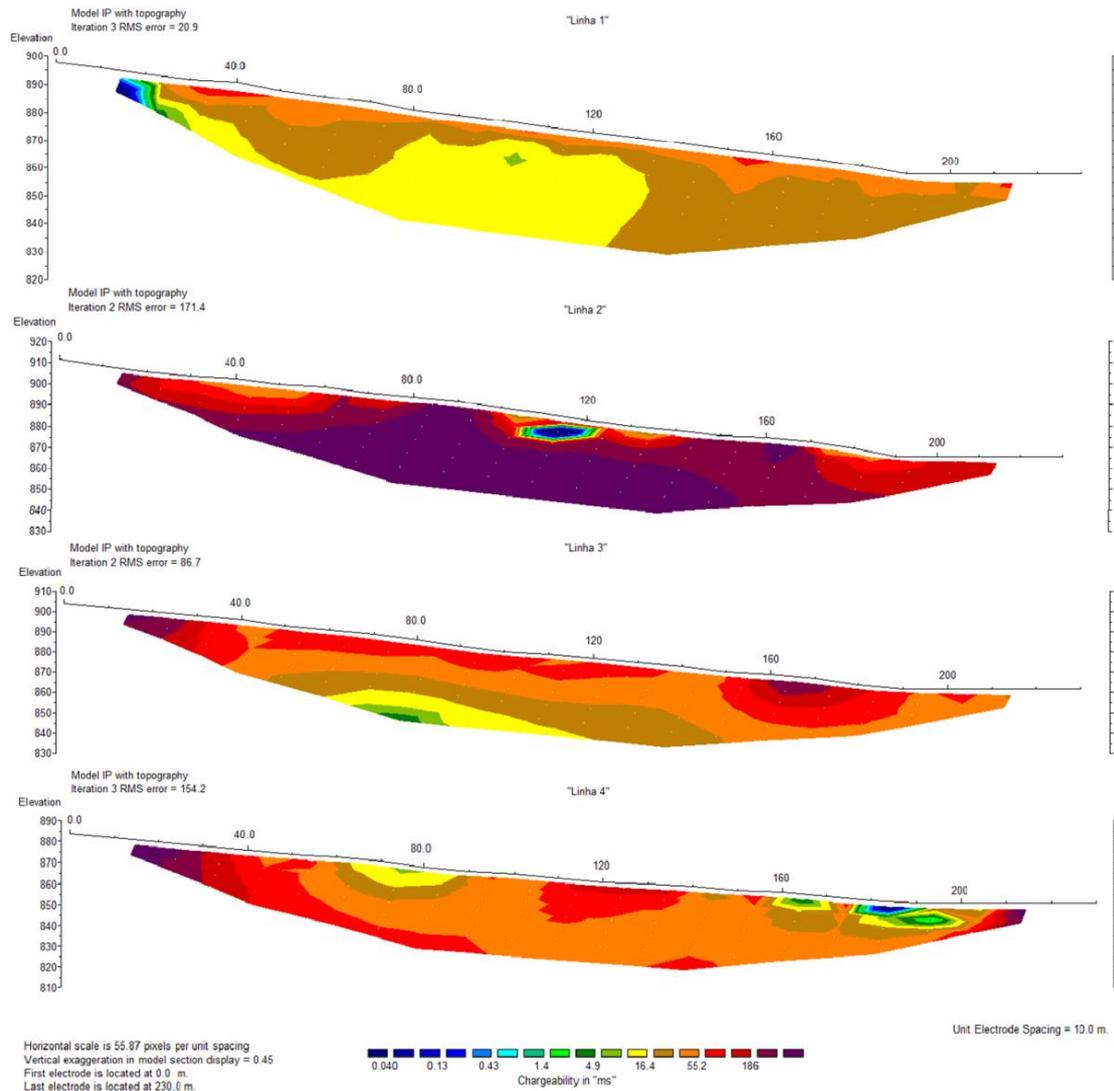


Figura 15: seções de cargabilidade para as 4 linhas de caminhamento elétrico.

Esta hipótese é corroborada pelo resultados obtidos por Ramazi (2013), indicaram alguns valores anômalos de potencial espontâneo de acordo com as anomalias de cargabilidade encontradas através do método da polarização induzida, e outros que foram correlacionados à presença de argilominerais no solo e que não indicavam presença de mineralização.

Um comparativo entre os modelos de inversão de resistividade elétrica e cargabilidade para cada linha, revelou na linha 1 valores de resistividade entre 5293 Ohm.m a 14.222 Ohm.m e cargabilidade entre 9 ms e 29.4 ms (Figura 16). Na linha 2 os valores de resistividade ficam entre 273 Ohm.m e 733 Ohm.m enquanto a cargabilidade tem valores acima de 186 ms (Figura 17). As

linhas 3 e 4 mantêm a resistividade na ordem de 14.222 Ohm.m e cargabilidade na ordem de 55.2 ms (Figuras 20 e 21).

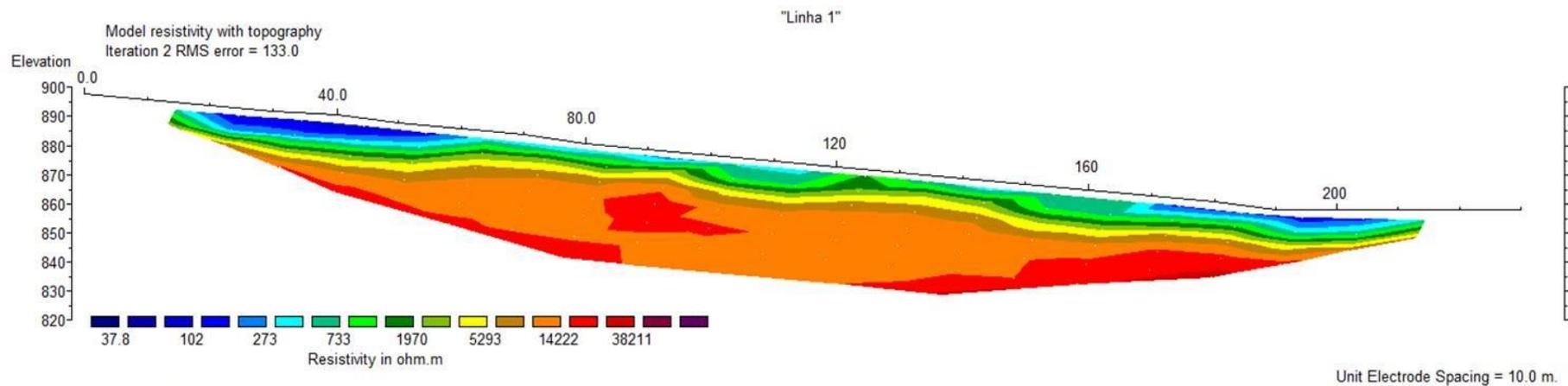
Na linha 2 foram encontradas rochas com minério aflorante (Figuras 18 e 19), o que sugere que nesta posição a mineralização pode ser maciça, e na linha 1 pode estar disseminada ou inexistente. O mesmo pode acontecer nas linhas três e quatro, que não indicaram contrastes expressivos para existência do minério.

Os valores de cargabilidade ficam em torno de 186 ms. Em campo, foram localizadas rochas com óxido de manganês em pontos dessa linha (Figura 18), o que revela a existência da mineralização em subsuperfície nessa região.

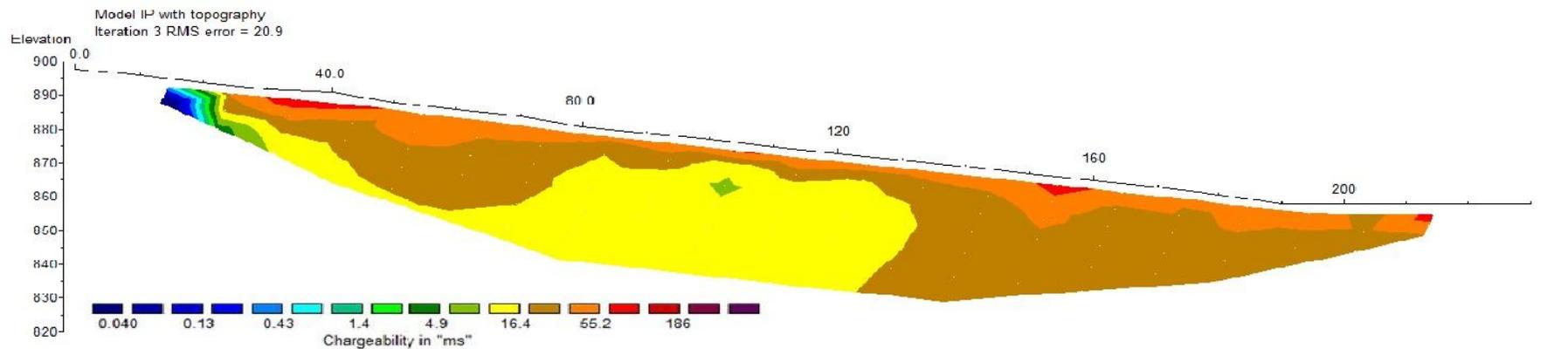


Figura 18: Afloramento próximo ao início da linha 2 apresentando mineralização.

A linha 3 apresenta valores de cargabilidade baixos (em torno de 55 ms) se comparados com a linha 2, e próximos aos valores encontrados na linha 1. Uma análise da variação de valores, indica que a mineralização não teria continuidade lateral no sentido onde as linhas estão localizadas. Essa informação é corroborada pela linha 4, com valores em torno de 55 ms.

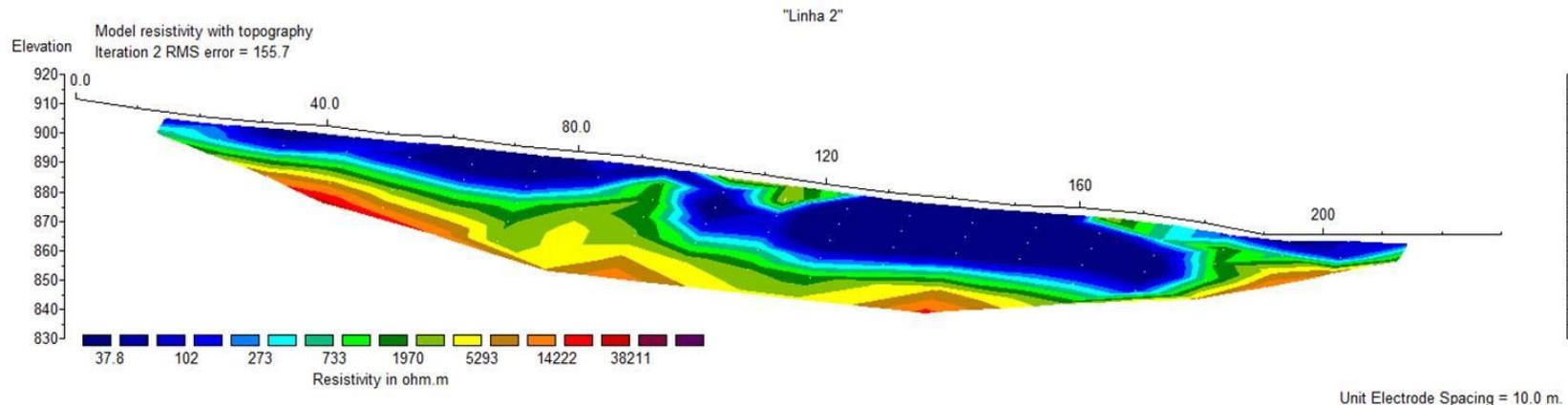


Horizontal scale is 55.83 pixels per unit spacing
Vertical exaggeration in model section display = 0.45
First electrode is located at 0.0 m.
Last electrode is located at 230.0 m.

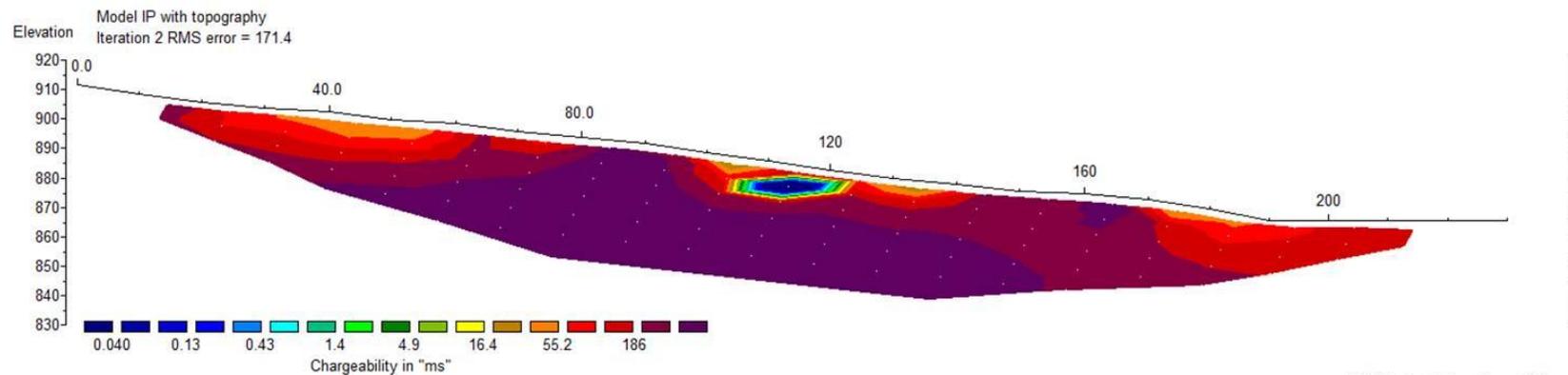


Horizontal scale is 55.87 pixels per unit spacing
Vertical exaggeration in model section display = 0.45
First electrode is located at 0.0 m.
Last electrode is located at 230.0 m.

Figura 16: resistividade e cargabilidade para linha 1.



Horizontal scale is 55.87 pixels per unit spacing
Vertical exaggeration in model section display = 0.45
First electrode is located at 0.0 m.
Last electrode is located at 230.0 m.



Horizontal scale is 55.87 pixels per unit spacing
Vertical exaggeration in model section display = 0.45
First electrode is located at 0.0 m.
Last electrode is located at 230.0 m.

Figura 17: resistividade e cargabilidade para linha 2.

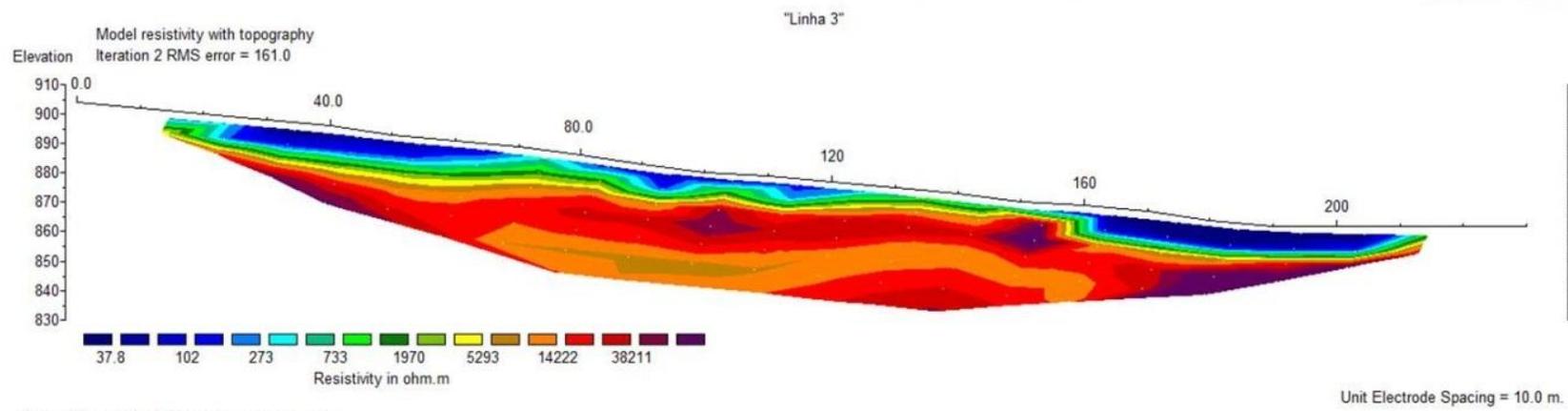


Figura 19: Mineralização em afloramento nas proximidades do início da linha 2.

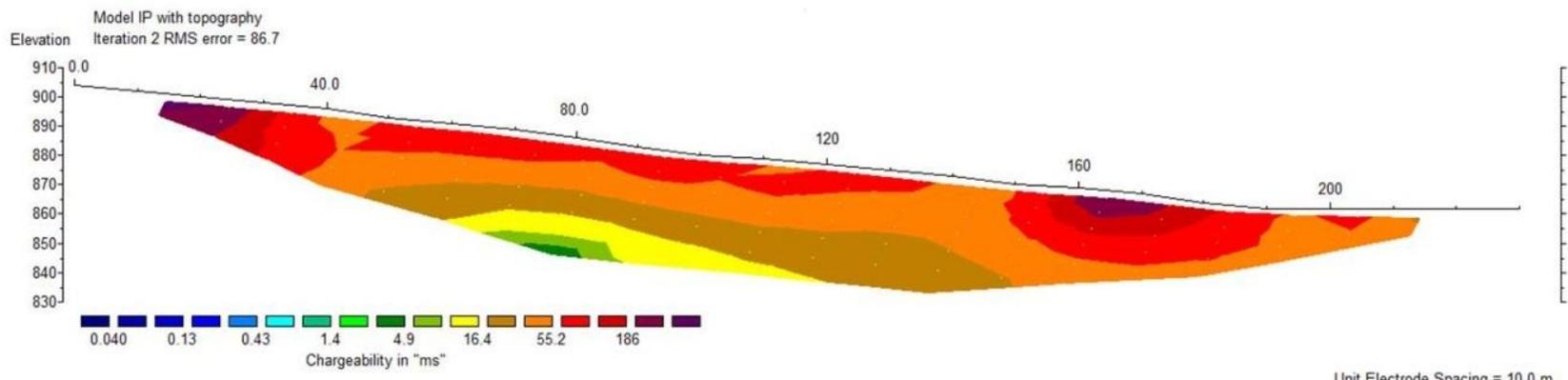
Estes resultados estão de acordo com a pesquisa de Ramazi (2013), onde os maiores contrastes de cargabilidade foram encontrados no centro da mineralização, considerando valores maiores que 18 mV/V anomalias regionais, acima de 24 mV/V o centro da mineralização e os valores menores que 18 mV/V ruídos de fundo. Furos de sondagem foram realizados nos locais considerados de valores anômalos, onde foram encontradas concentrações de óxido de manganês.

Murthy (2009) encontrou altos valores de resistividade elétrica, corroborados pelo mapa de campo magnético total. Considerando que a área de estudos está localizada sobre rochas quartzíticas, que apresentam valores altos de resistividade elétrica e que a ocorrência de óxido de manganês se encontra nessa litologia, e comparando com os resultados do presente estudo, a diferença de resultados se dá pela diferença de litologia.

O estudo mostra uma semelhança de resultados, em termos de parâmetros físicos, entre óxidos e sulfetos conforme pesquisa de Moreira (2012a) e Moreira (2011), onde o sulfeto de cobre objeto da pesquisa apresenta altos valores de cargabilidade nos locais onde existe a ocorrência.

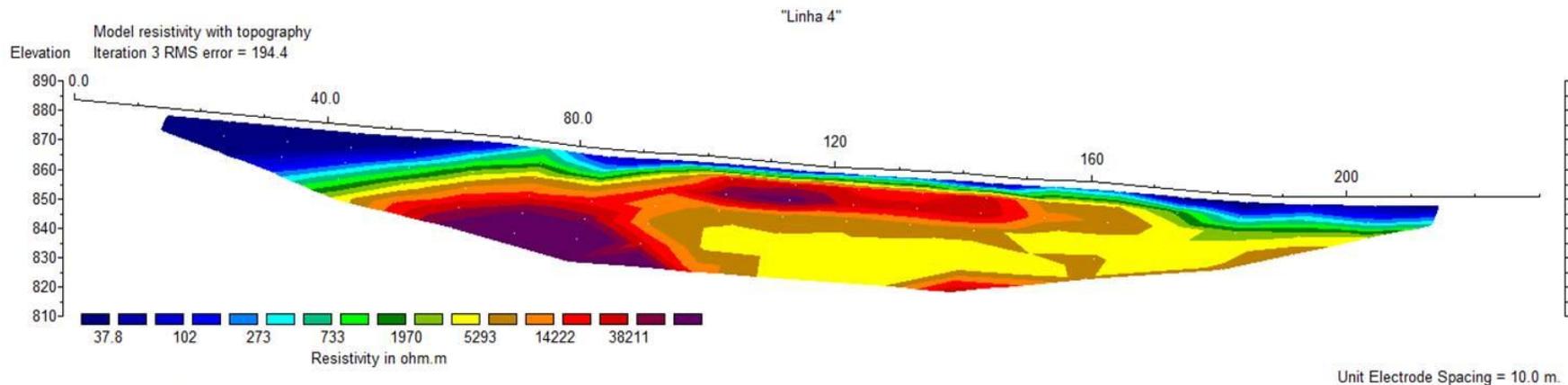


Horizontal scale is 55.87 pixels per unit spacing
Vertical exaggeration in model section display = 0.45
First electrode is located at 0.0 m.
Last electrode is located at 230.0 m.

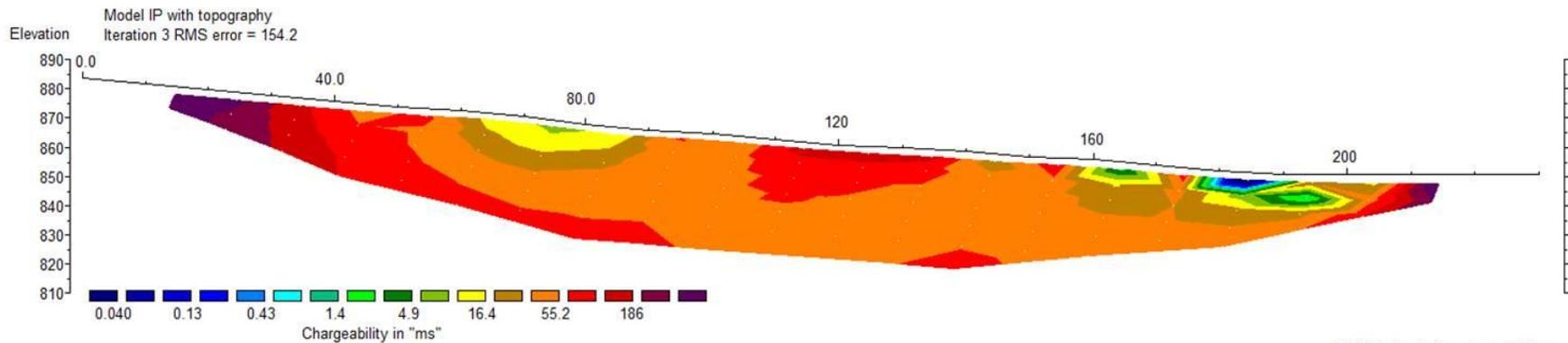


Horizontal scale is 55.87 pixels per unit spacing
Vertical exaggeration in model section display = 0.45
First electrode is located at 0.0 m.
Last electrode is located at 230.0 m.

Figura 20: resistividade e cargabilidade para linha 3.



Horizontal scale is 55.87 pixels per unit spacing
Vertical exaggeration in model section display = 0.45
First electrode is located at 0.0 m.
Last electrode is located at 230.0 m.



Horizontal scale is 55.87 pixels per unit spacing
Vertical exaggeration in model section display = 0.45
First electrode is located at 0.0 m.
Last electrode is located at 230.0 m.

Figura 21: resistividade e cargabilidade para linha 4.

8 Conclusões

Com este estudo é possível afirmar que os métodos geoeletricos da eletrorresistividade e polarização induzida foram eficazes na prospecção de óxidos de manganês, diante do contraste de propriedades físicas entre as rochas encaixantes (gnaisses e quartzitos) e a rocha onde o minério está contido (gondito).

A eficiência dos métodos empregados está relacionada a cada tipo de parâmetro físico medido.

A assinatura geofísica da ocorrência mineral nesse estudo foi de alta cargabilidade e baixa resistividade. O fenômeno polarização eletrônica explica a alta cargabilidade, pois em presença de minerais metálicos (neste caso, o óxido de manganês) a polarizabilidade do material é maior, ou seja, ocorre um acúmulo substancial de elétrons durante o ensaio. Após o corte de corrente, os íons se dissipam lentamente, causando o efeito conhecido como polarização eletrônica.

Os valores altos a médios de resistividade podem ser relacionados à litologia composta por quartzitos e gnaisses da rocha encaixante, porém, alguns dados de leitura podem estar sujeitos à presença do minério disseminado no solo, o que altera a resposta esperada para o tipo de litologia presente na região.

Os altos valores de cargabilidade estão relacionados à presença da mineralização aflorante, conforme foi constatado em campo. Os óxidos neste estudo, tiveram resposta semelhante a dos sulfetos em termos de cargabilidade.

O arranjo Wenner-Schlumberger foi eficaz na pesquisa, pois mesmo com a baixa potência de corrente enviada pelo equipamento, com o uso de um arranjo híbrido, a corrente pode ser injetada nos dois extremos de cada linha, o que aumenta a razão sinal/ruído e alcança maior profundidade.

A disposição das linhas em campo permitiu um estudo em termos de continuidade lateral da ocorrência mineral, e resultou na sugestão de que não existe continuidade da ocorrência na direção em que foram realizadas, porém, devido à baixa profundidade de estudos atingida, não é possível confirmar a profundidade da ocorrência.

A anomalia descrita na seção 2, está relacionada a presença da ocorrência mineral, sendo esta provavelmente maciça, e pode haver continuidade da ocorrência no lado oposto ao de realização da pesquisa.

Para futuros estudos geofísicos nessa área, métodos como magnetometria são recomendados para o mapeamento e localização da ocorrência mineral, pois a resposta é satisfatória na determinação das zonas de mineralização metálica devido a presença de minerais magnetizáveis junto a ocorrência.

Portanto, o uso dos métodos da eletrorresistividade e polarização induzida são úteis na pesquisa de metais, estejam eles na forma de óxidos ou sulfetos, devido à resposta semelhante nos altos valores de cargabilidade e baixos valores de resistividade.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CPRM - Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais. **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil: carta geológica, carta metalogenética/provisional-** escala 1:50.000 (Folha SF.23-Y-B-II-2Heliadora) Estados de Minas Gerais. Brasília: DNPM/CPRM.1988. 119p. il.

CPRM - Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais. **Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil** – Texto, Mapas & SIG, Brasília, Serviço Geológico do Brasil, 2003.

DeGROOT-HEDLIN, C. & CONSTABLE, S. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*, n. 55, p. 1613- 1624. 1990.

DNPM – DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Balanço Mineral Brasileiro**. Brasília, 2001.

DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral Economia Mineral do Brasil. Coordenação. Antonio Fernando da Silva Rodrigues. – Brasília-DF: 2009. 764 p. – Ilustradas

EDWARDS, L.S., A modified pseudosection for resistivity and induced polarization. *Geophysics*. v. 42, p. 1020 - 1036, 1977.

GOOGLE EARTH. Versão 7.0.3.8542.US Dept. of state Geographer, 2013.
<http://www.careacu.mg.gov.br/> - Prefeitura Municipal de Careáçu. Acesso em janeiro/2013.

KEAREY, Philip.; BROOKS, Michael.; HILL, Ian. An introduction to Geophysical Exploration. Blackwell Science, London, 3oed., 2002, 281p.

LOKE, MengHeng & BARKER, Ron. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudo sections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, n. 44, p. 131-152. 1996.

LOWRIE, W. **Fundamentals of Geophysics**. Cambridge University Press, UK, 2007, 381p.

McNeill, J.D, 1980, Electrical conductivity of soils and rocks, Tech. Note TN-5 Geonics Ltd., disponível em: www.geonics.com/lit.html Acesso em maio/2013.

MILSON, J. **Field Geophysics**. Wiley, England, 2003, 232 p.

MOREIRA, C A ; LOPES, S. M. ; SCHWEIG, C.. Polarização Induzida aplicada no estudo de ocorrência de Cobre localizada a noroeste de Caçapava do Sul - RS. **Geociências** (São Paulo. Online), v. 31, p. 321-330, 2012a

MOREIRA, C A ; BORGES, M. R. ; VIEIRA, G.M.L.; MALAGUTTI FILHO, W.; MONTANHEIRO, M.A.F.. Geological and geophysical data integration for delimitation of mineralized areas in a supergene manganese deposits **Geofísica Internacional** v. 53, n1 p. 201-212, 2012a

MOREIRA, C.A.; ILHA, L. M.; Prospecção geofísica em ocorrência de cobre localizada na bacia sedimentar do Camaquã (RS). REM. **Revista Escola de Minas**, v. 64, p. 305-311, 2011.

Murthy B.V.S., B. Madhusudan Rao, A.K. Dubeyand Srinivasulu. Geophysical exploration for manganese-some firsthand examples from Keonjhar district, Orissa.J. Ind. Geophysics. Union. Vol.13, Nº.3, pp.149-161, July 2009.

PEREIRA, R.M. Fundamentos de Prospecção Mineral. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 167 p., 2003.

Ramazi, H. & Mostafaie, K.. Application of integrated geoelectrical methods in Marand (Iran) manganese deposit exploration. Arab J Geosci. N°6, p 2961-2970. 2013.

Talabi, A. O., Oladimeji L. Ademilua, Olusola Z. Ajayiand Simeon O. Ogunniyi. Preliminary Geophysical Evaluation of Orin Bauxite Deposit Southwestern Nigeria. Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences.v.4, nº3, p.432-437, 2013.

TELFORD, William Murray; GELDART, Lloyd Phillip; SHERIFF, Robert Edward. Applied Geophysics. 2. ed. New York: Cambridge University Press, 770 p. 1990.

VERÍSSIMO, C. U. Evolução geológica dos corpos de protominério e mineralizações de manganês associadas,porção leste de São Paulo e Sul de Minas Gerais. Dissertação (Mestrado)-Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro (SP), 1991.

APÊNDICE I

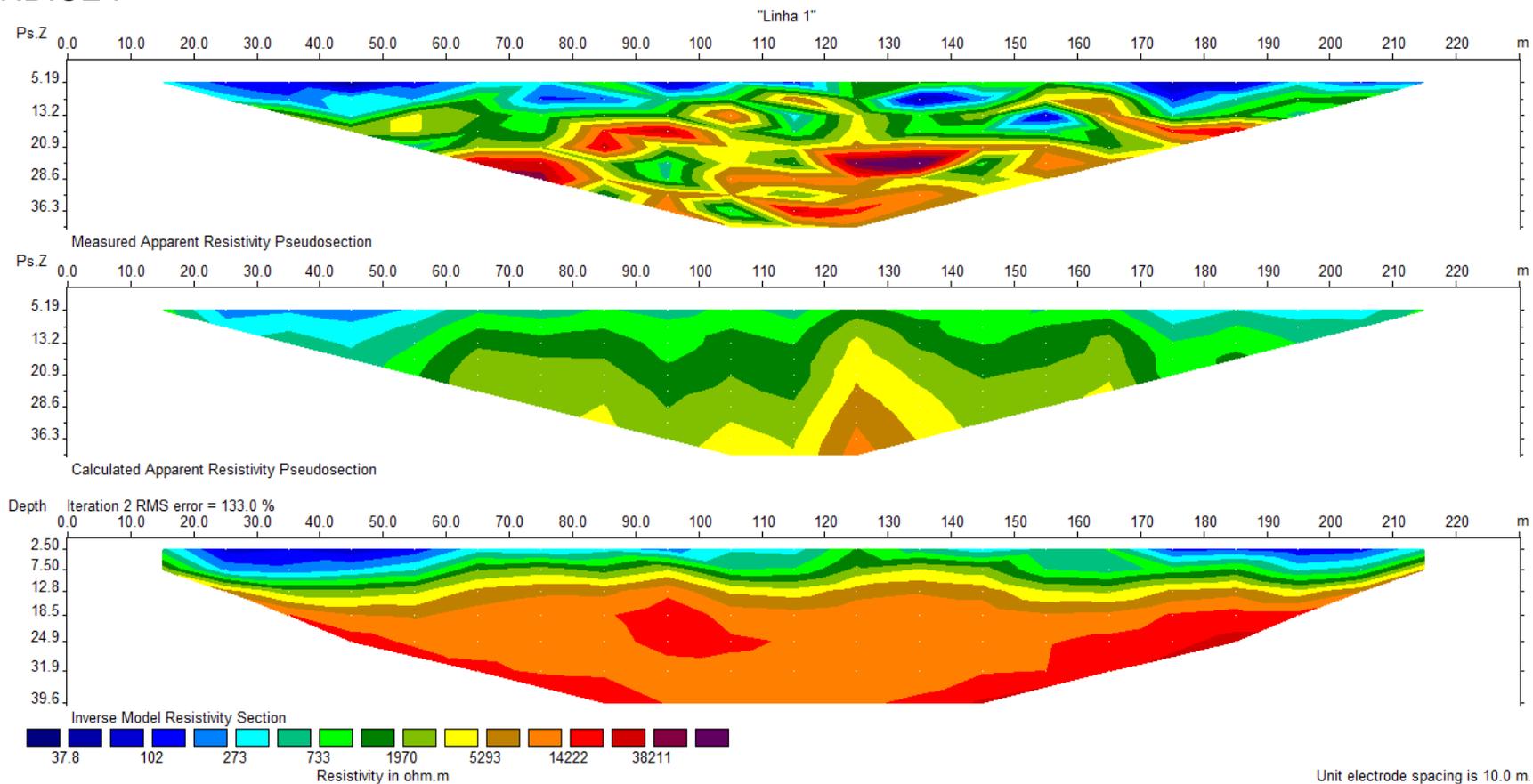


Figura 22: Pseudo-seção de resistividade medida, resistividade aparente calculada, e modelo de inversão da linha 1.

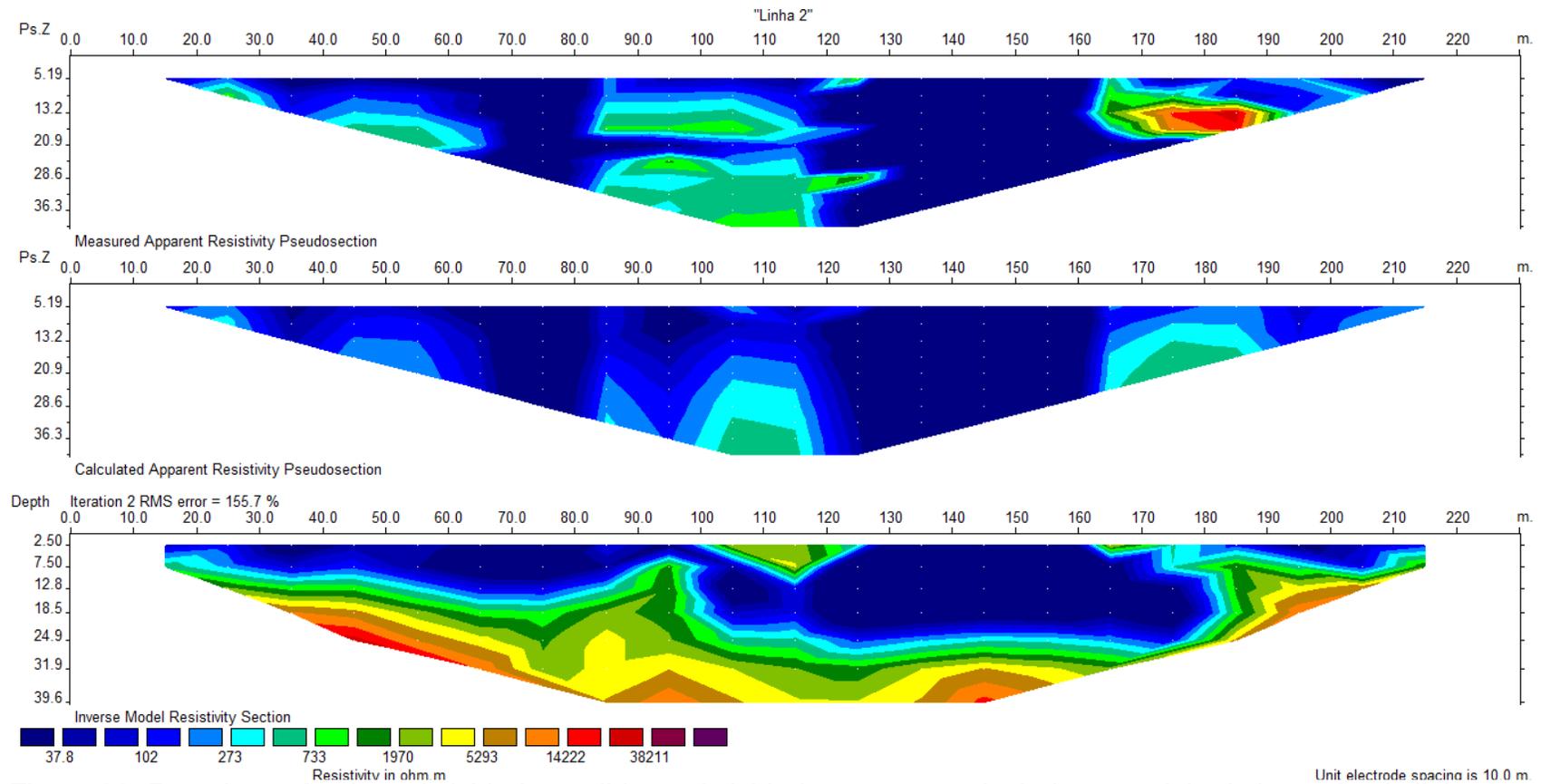


Figura 23: Pseudo-seção de resistividade medida, resistividade aparente calculada, e modelo de inversão da linha 2.

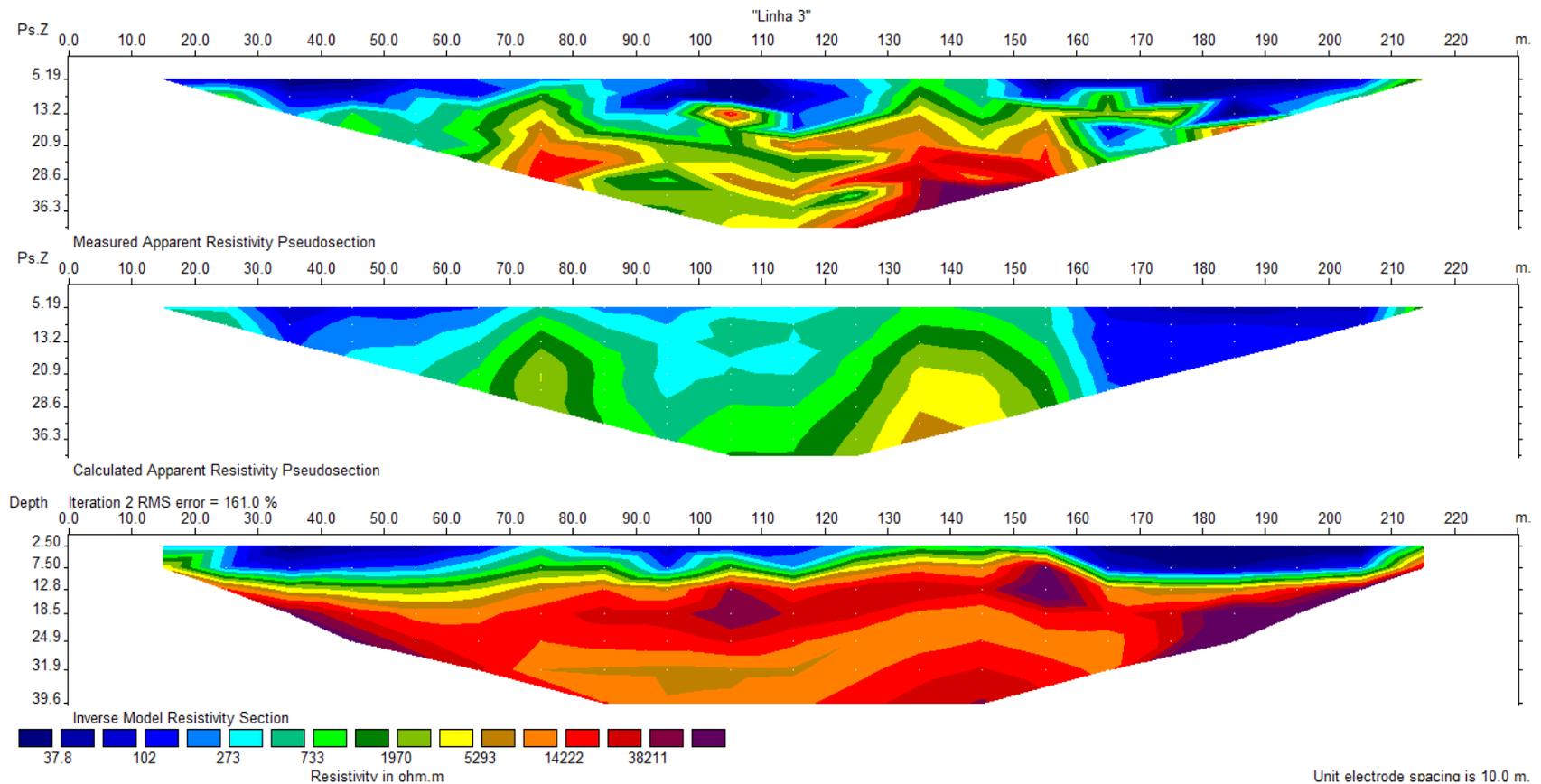


Figura 24: Pseudo-seção de resistividade medida, resistividade aparente calculada, e modelo de inversão da linha 3.

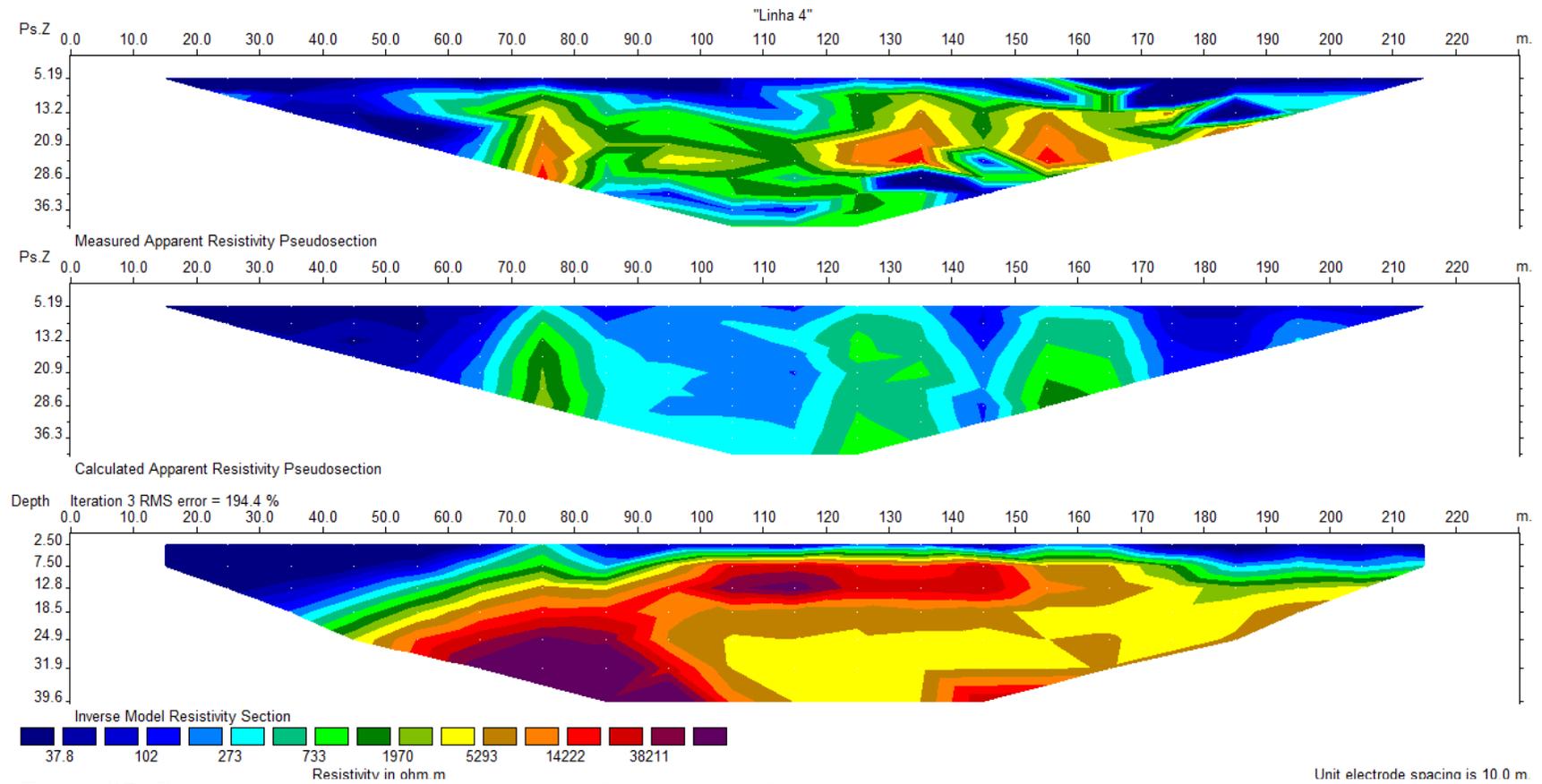


Figura 25: Pseudo-seção de resistividade medida, resistividade aparente calculada, e modelo de inversão da linha 4.

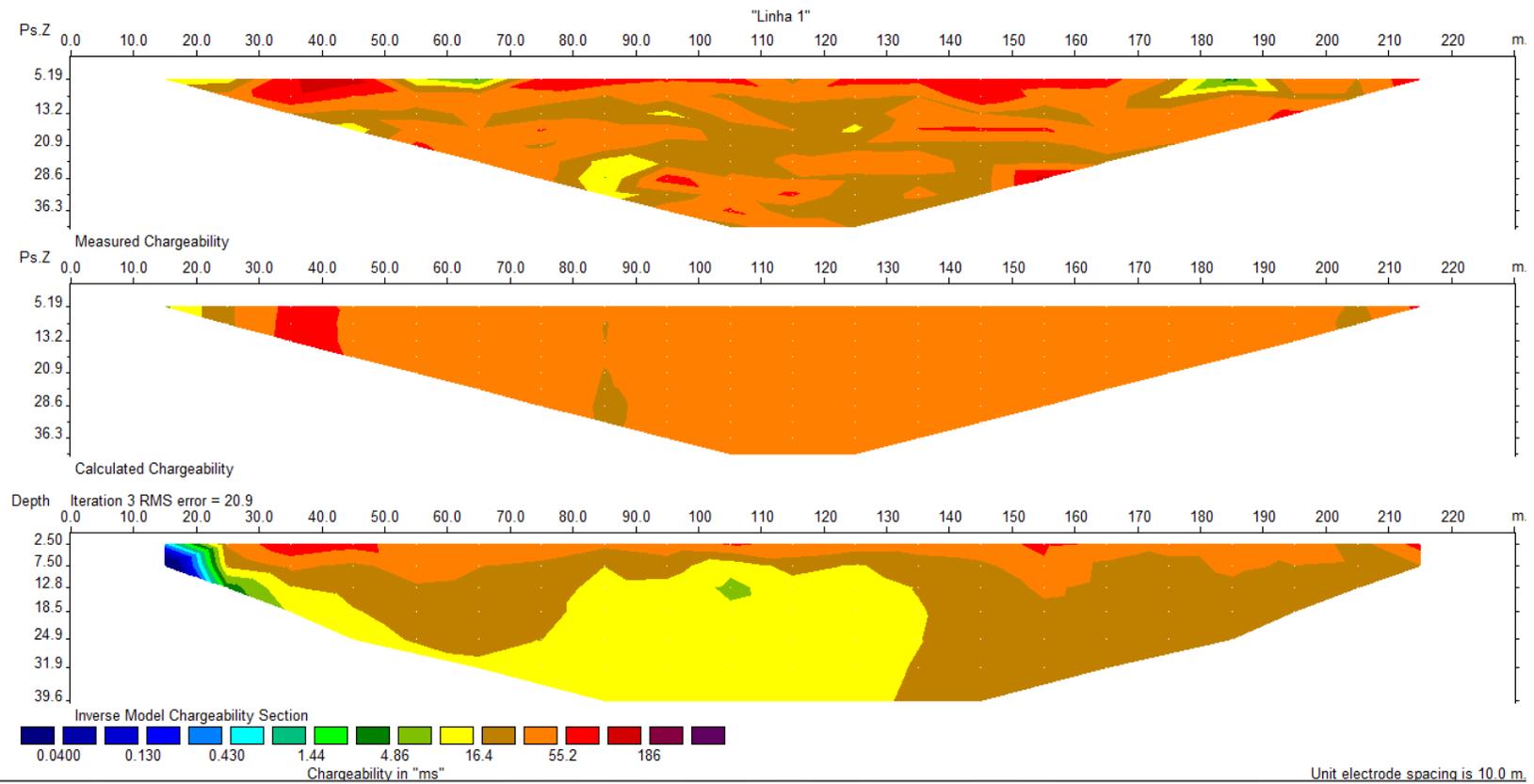


Figura 26: Cargabilidade medida, cargabilidade calculada e modelo de inversão de cargabilidade para linha 1.

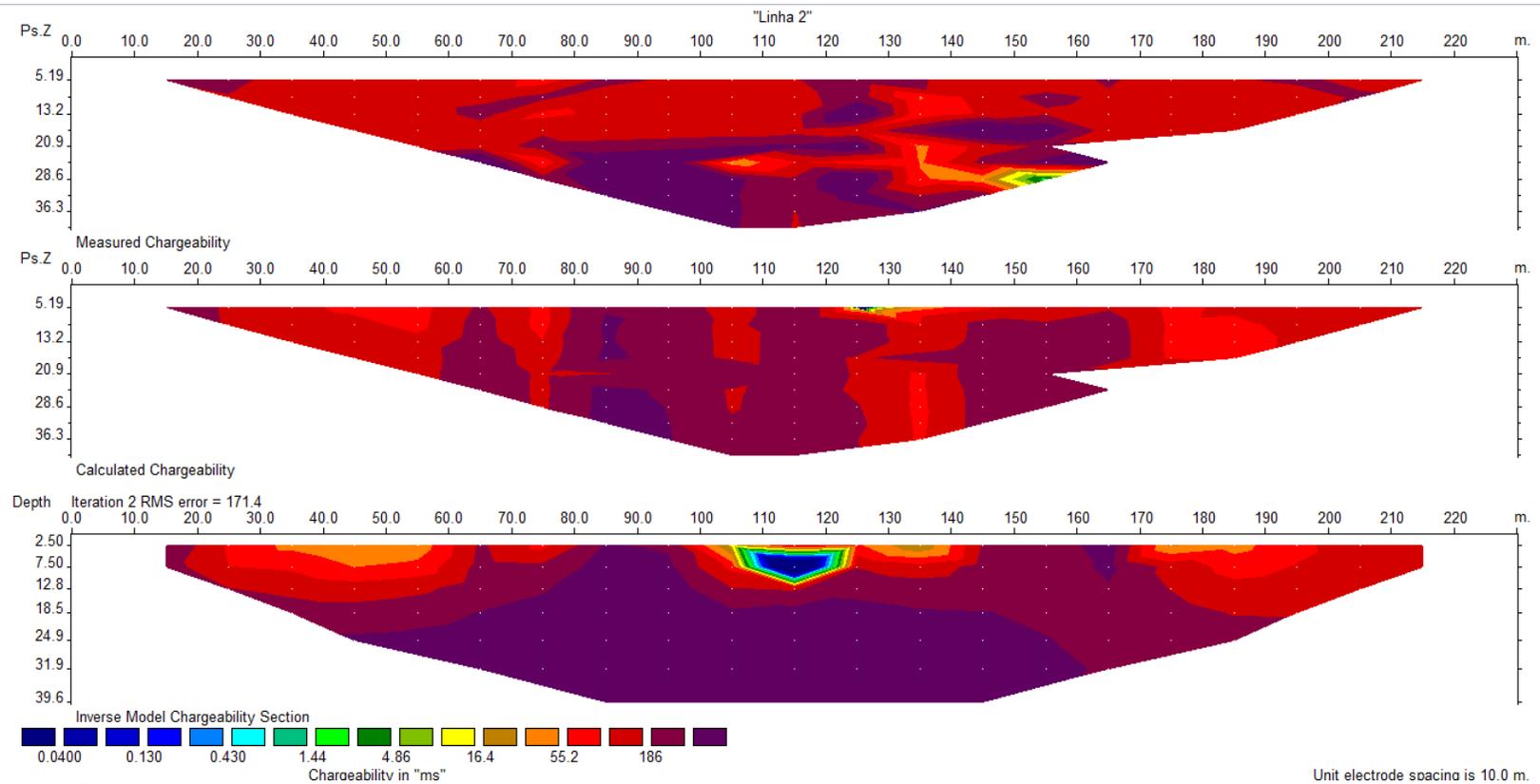


Figura 27: Cargabilidade medida, cargabilidade calculada e modelo de inversão de cargabilidade para linha 2.

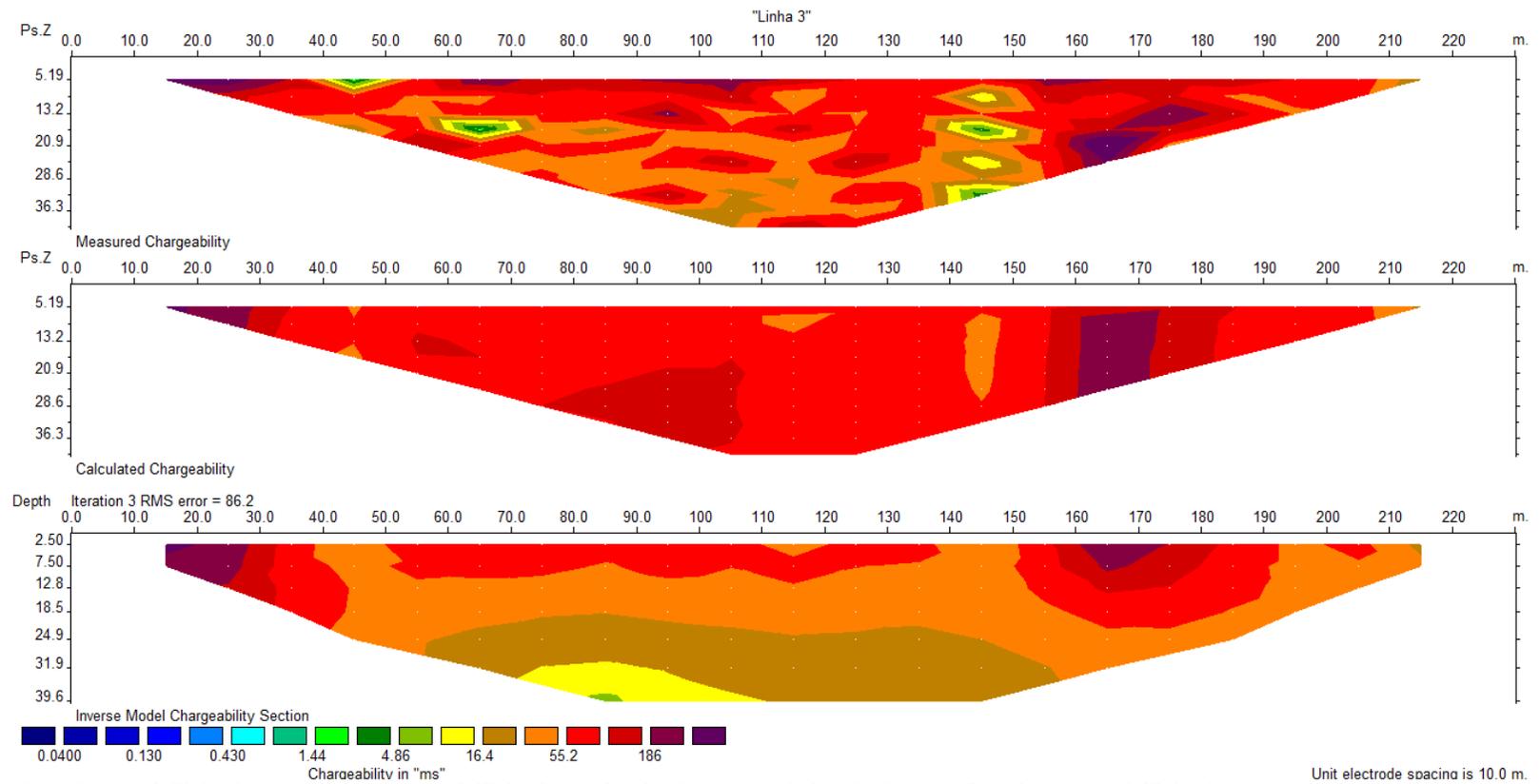


Figura 28: Cargabilidade medida, cargabilidade calculada e modelo de inversão de cargabilidade para linha 3.

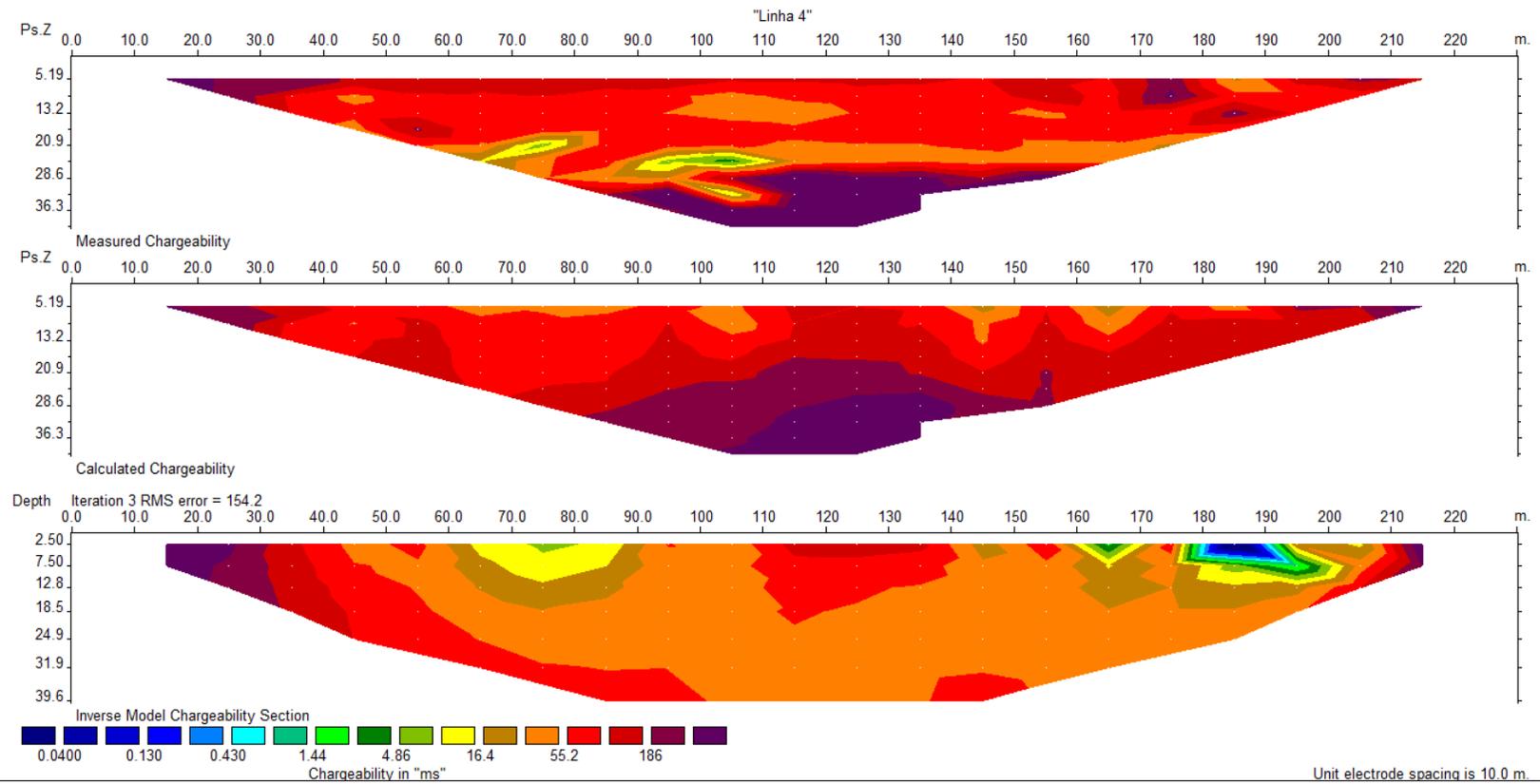


Figura 29: Cargabilidade medida, cargabilidade calculada e modelo de inversão de cargabilidade para linha 4.