



## Resistividade e polarização induzida no estudo de depósito de resíduos instalado em depressão originada de processos erosivos

Vagner Roberto Elis, IAG/USP  
Osni José Pejon, EESC/USP  
Marlon Cabrera Hidalgo-Gato, CGG-Veritas  
Andrea Teixeira Ustra, IAG/USP

Copyright 2013, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 13<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 26-29, 2013.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 13<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

### Abstract

A site where there was a “voçoroca” (geomorphological feature originated from the erosion), in São Carlos - SP, was used as a deposit of domestic waste. The disposal was done without any technical procedure to contain contaminants. The site is unsuitable for such use because it is in the recharge area of Botucatu Aquifer (sandstones). In permeable substrate the flow of water containing dissolved contaminants causes the contamination from spreading, that affects seriously the aquifer. This paper aims to study the geometry of the deposit and the contamination caused by the wastes, using resistivity and induced polarization methods, with dipole-dipole array. For mapping the site were performed six surveys lines - five across the deposit and one external to it. Geoelectrical data was interpreted by inversion software. It was generated sections of resistivity, chargeability and normalized chargeability. The geoelectric sections were integrated with wells information to help in the characterization of waste area and to evaluate soil and groundwater contamination.

### Introdução

O aumento do volume de resíduos vem causando problemas no que diz respeito ao seu destino final. Normalmente os rejeitos sólidos são concentrados, sendo em seguida colocados no ambiente sob alguma forma de disposição. Essa forma de disposição, se não observadas as características do ambiente e não obedecidas as técnicas seguras de instalação e manejo, pode gerar contaminação nos mananciais subterrâneos. Não tendo tratamento adequado, os resíduos acarretam altos riscos de poluição. A construção de aterros de resíduos sólidos deve obedecer a normas mínimas, regidas por legislação.

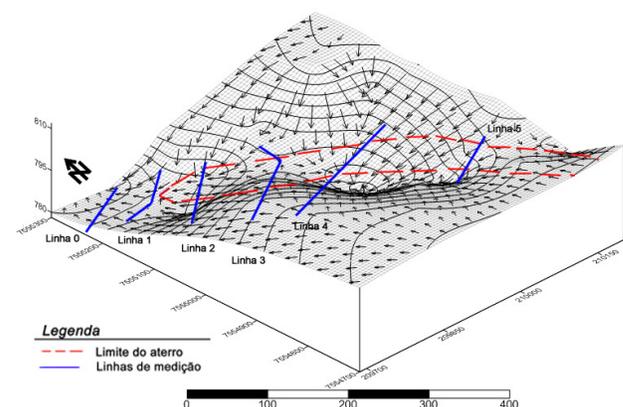
No caso de depósitos antigos, embora estejam desativados, a disposição de resíduos de origem doméstica ainda permanece causando contaminação em água subterrânea, especialmente quando estes são localizados em locais hidrogeologicamente vulneráveis. O fluxo de águas subterrâneas é o principal responsável pela diluição do material contaminante o que conseqüentemente possibilita o desenvolvimento da

pluma de contaminação no interior da zona saturada, e futuramente afetará maior área com menor concentração de poluentes. As plumas de contaminação geradas pelas áreas de disposição de resíduos urbanos possuem, normalmente, altas concentrações de sais, como cloretos e sulfatos. Altos valores de salinidade refletem em altos valores de condutividade. Isso torna os métodos elétricos e eletromagnéticos de prospecção geofísica apropriados à detecção e mapeamento da pluma de contaminação.

### Área de estudo

A área de estudo situa-se a 20 km do centro da cidade de São Carlos. Segundo a história da região, os dejetos foram despejados numa antiga voçoroca (depressão natural provocada por intensa erosão).

A área com resíduos tem aproximadamente 600m de comprimento por 100m de largura. Esta área recebeu os resíduos de origem industrial, domésticos e hospitalares durante um período de sete anos, encerrando e posteriormente aterrando o material em 1996. A **Figura 1** mostra a topografia do local em escala vertical exagerada. Mediante este mapa em três dimensões é de se esperar o escoamento da água para NW (drenagem), assim como o fluxo da pluma de contaminação na mesma direção.



**Figura 1** - Mapa de Topografia e gradiente vertical da região com exagero vertical.

A região está inserida na borda leste da Bacia do Paraná, onde afloram as formações Pirambóia, Botucatu e Serra Geral do grupo São Bento e Bauru (ÁLVARES, 2000). A Formação Botucatu ocupa a maior parte da área de estudo. Gonçalves (1986) caracterizou

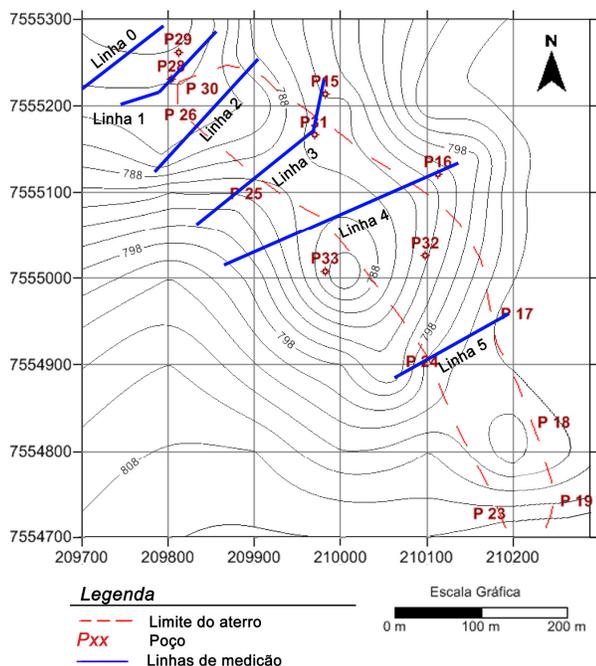
os sedimentos da área como de granulometria predominantemente arenosa fina, pontualmente mais argilosa ou siltosa. Estes solos foram formados a partir do intemperismo da formação Botucatu que abriga um dos mais importantes reservatórios de água subterrânea do mundo, o Aquífero Guarani.

Trabalhos anteriores mostraram que esta região é imprópria para a disposição dos resíduos devido a:

- O nível da água se apresentar a pouca profundidade, eventualmente acima dos resíduos como comprovado por furos de sondagens realizados anteriormente.
- O solo arenoso apresentar alta permeabilidade, o que permite a percolação e difusão da pluma de contaminação no solo e no lenço freático.
- A região possuir alto potencial de erosão em decorrência do clima e da topografia.

### Metodologia

Foram realizadas 6 linhas de ensaio de resistividade e polarização induzida, com arranjo dipolo-dipolo, espaçamento de 10 metros e 6 níveis de investigação. Para melhor análise dos dados, este trabalho considera dados de furos de sondagens que existem nas linhas de caminhamento elétrico (**Figura 2**). Os furos mostram a profundidade do nível da água, assim como a disposição resíduos/areia contaminada. Este trabalho utiliza dados de resistividade, cargabilidade e cargabilidade normalizada, para procurar definir com maior precisão as zonas efetivamente afetadas.



**Figura 2** - Disposição das linhas de aquisição e dos poços de observação.

O método da eletrorresistividade emprega uma corrente elétrica artificial que é introduzida no terreno através de dois eletrodos (denominados A e B), com o objetivo de medir o potencial gerado em outros dois

eletrodos (denominados M e N) nas proximidades do fluxo de corrente, permitindo assim calcular a resistividade real ou aparente em subsuperfície. A resistividade (e seu inverso, a condutividade) dos solos e rochas pode ser afetada principalmente pela composição mineralógica, porosidade, teor em água e natureza dos sais dissolvidos, o que permite a imensa possibilidade de aplicação do método em estudos ambientais e hidrogeológicos. Dentro do método da eletrorresistividade existem várias técnicas de aplicação de sondagem elétrica e caminhamento elétrico, dentro dos quais existe uma grande variedade de configurações eletródicas possíveis, o que confere ao método um elevado grau de versatilidade.

A polarização induzida é um fenômeno elétrico estimulado por corrente, observado como resposta retardada à voltagem, em materiais naturais (Summer, 1976). O fenômeno se observa quando se faz passar corrente elétrica através de um eletrólito que contém corpos ou partículas que possuem condutividade eletrônica. O método da polarização induzida possibilita, de forma análoga a eletrorresistividade, a realização de sondagens e caminhamentos, utilizando as diversas configurações eletródicas possíveis.

A técnica utilizada neste trabalho foi o caminhamento elétrico dipolo-dipolo com espaçamento de 10m. Seis linhas de caminhamento elétrico foram realizadas na área de estudo, denominadas de Linha 0 a Linha 5. A Linha 0 foi executada a jusante da área, com o objetivo de identificar zonas anômalas que podem caracterizar o desenvolvimento de uma provável contaminação dentro da zona saturada. As demais foram realizadas de forma a atravessar o corpo de resíduos em diferentes posições. Os dados foram interpretados por meio de inversão com vínculo de suavidade, com o uso do software RES2DINV (Loke, 2007).

A utilização conjunta de resistividade e IP em estudos de áreas de disposição de resíduos tem mostrado que existem alguns fatores complicantes na interpretação dos resultados. Entre esses complicantes estão a concentração salina na pluma e variações no teor de argila nos solos. Esses dois fatores influenciam na resposta geoeletrica, podendo dificultar a correta interpretação do formato e extensão da área afetada pela contaminação. Griffiths et al. (1981) realizaram estudos experimentais com arenitos argilosos saturados, e mostram que a polarização cresce até um máximo e então começa a decair. Slater & Lesmes (2002) usaram a cargabilidade normalizada (Mn) para estudar a interdependência entre salinidade e teor em argila.

Sendo a cargabilidade (M), a cargabilidade normalizada pela resistividade (Mn) é dada pela fórmula (Slater & Lesmes, 2002):

$$Mn = \frac{M}{\rho_a} \quad (1)$$

onde:

Mn = cargabilidade normalizada pela resistividade.

M = dado bruto da cargabilidade.

$\rho_a$  = resistividade aparente medida em campo sem tratamento prévio.

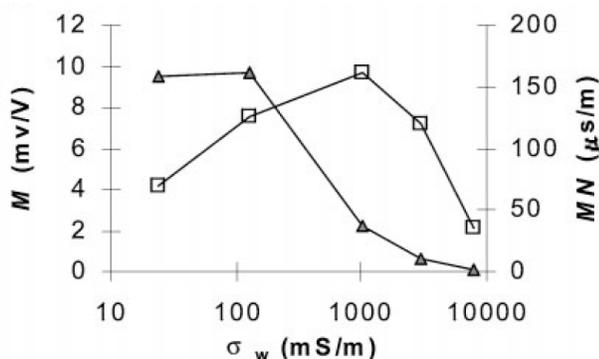
Unidade de [Mn]:

$$[Mn] = \frac{[miliV]}{[\Omega.][m][V]} = \frac{[miliS]}{[m]} \quad (2)$$

onde:

[S] = Siemens =  $1/\Omega$  = unidade de condutância (inverso da resistência).

A cargabilidade normalizada quantifica a magnitude da polarização superficial que é fortemente relacionada a litologia. Estes autores mostram (**Figura 3**) como os parâmetros M e Mn variam em função da condutividade do fluido de preenchimento dos poros. Pode-se notar que a cargabilidade tende a decrescer para concentrações salinas relativamente baixas (condutividade do fluido a partir de 100 mS/m), ao passo que a cargabilidade normalizada tende a aumentar até valores de condutividade do fluido de 1000 mS/m.



**Figura 3** - Variação da cargabilidade(M) e cargabilidade normalizada (Mn) em função da condutividade( $\sigma$ ). Ensaio em laboratório com arenitos porosos variando a concentração salina do fluido intersticial. Quadrados – Mn. Triângulos – M. (Slater & Lesmes, 2002).

No caso em questão, por se tratar de uma região contaminada em solos arenosos com teores variáveis de argila, espera-se valores altos de condutividade para a zona afetada. Dessa forma, os valores de cargabilidade normalizada devem apresentar-se elevados em regiões contaminadas e mais baixos em regiões não contaminadas e não saturadas pela água. Dessa forma, espera-se que a cargabilidade normalizada delimite de forma mais realística a zona de influência da contaminação dentro das águas subterrâneas.

## Resultados

As seções obtidas para as 3 linhas de investigação serão mostradas a seguir, sempre na seguinte ordem: (a) Resistividade, (b) Cargabilidade e (c) Cargabilidade Normalizada. Para uma melhor análise, foram colocados dados de furos de sondagens localizados nas linhas de investigação quando disponíveis. Estes dados foram retirados de Velozo, 2006.

A Linha 3 está posicionada mais a montante. A seção de resistividade 3 (**Figura 4**) mostra valores baixos entre 7.1 ohm.m e 28.0 ohm.h para regiões

contaminadas como verificado pelo poço Pm31 e valores superiores para regiões não contaminadas (poços Pm25 e Pm15). Os valores baixos de resistividade delimitam as bordas da região contaminada e mostram também a zona saturada contaminada. Diferentemente dos casos anteriores, nesta linha ambas as 3 seções podem ser utilizadas para delimitar as bordas do aterro. Na seção de cargabilidade, é possível observar valores mais altos na área com resíduos (cerca de 50 mV/V), e valores um pouco menores próximo da superfície da zona saturada (20 mV/V). Normalmente o corpo de resíduos tende a apresentar valores mais elevados de cargabilidade por apresentar materiais polarizáveis e estar posicionado, em sua maior parte, acima da zona saturada. Na seção de cargabilidade normalizada é possível delimitar as bordas do aterro entre 60 m e 160 m de distância, bem como a área afetada em profundidade.

Os valores baixos de resistividade (4.2 ohm.m e 19.9 ohm.m) da linha 1 (**Figura 5**) delimitam as bordas da região contaminada (entre 80m e 90m), e zona saturada contaminada. Os valores de resistividade se apresentam coerentes com os dados dos poços Pm 27 e Pm 28. Os altos valores de resistividade até os primeiros 30m, conjunto com o poço Pm27, comprovam que nesta região não tem presença de resíduos nem chorume. Observando a seção de cargabilidade não é possível observar as bordas do aterro. Os baixos valores de M nas proximidades do poço Pm28 e posteriormente entre 90m e 100m de distâncias, são provavelmente devido à migração dos solúveis polarizáveis em profundidade ou a zonas muito condutivas. É possível observar ainda que na porção central a profundidades a mais de 770 m existem zonas anômalas de alta cargabilidade, provavelmente devido à migração de solúveis. Por outro lado, a seção de cargabilidade normalizada se apresenta coerente com as bordas do lixão, delimitando a região contaminada com valores acima de 0,51 mS/m. Os valores entre 0,51 mS/m e 1.2 mS/m correspondem a regiões contaminadas pelo chorume e os valores superiores a 1.2 mS/m a região dos resíduos sólidos pela analogia com o poço Pm28.

Na **Figura 6** é possível observar as seções correspondentes a linha 0 de investigação. Esta linha não corta o corpo do lixão, servindo como linha referência para os valores de resistividade do meio. É possível observar na seção de resistividade que na porção central entre as profundidades de 770 e 762 existe uma região mais condutiva, provavelmente reflexo da migração do chorume no sentido SE-NW. O mesmo acontece na seção de cargabilidade, que apresenta valores baixos (menores que 5 mV/V) indicando aumento da salinidade na zona saturada. A seção de cargabilidade normalizada mostra a zona mais afetada, porém com menor contraste, por se apresentar fora do corpo de resíduos.

## Conclusões

Por meio da integração dos dados de resistividade, cargabilidade e cargabilidade normalizada e dados diretos de poços foi possível delimitar a região contaminada, assim como delimitar regiões críticas onde os elementos solúveis estão sendo infiltrados no lençol freático (zonas de migração de contaminantes). Foi possível mediante seções de cargabilidade normalizada

delimitar com maior precisão os limites laterais do aterro. Porém, não foi possível diferenciar regiões de resíduos sólidos de regiões contaminadas pelo chorume, isto devido principalmente ao nível da água pouco profundo na região, que em grande parte dos casos se apresentou acima da linha dos resíduos sólidos. Os resultados permitem inferir o sentido de migração da pluma de contaminação como concluído por trabalhos anteriores no sentido SE-NW. A cargabilidade normalizada auxiliou na delimitação da zona afetada pela contaminação, indicando os limites laterais do depósito e confirmando a influência da contaminação na zona saturada.

#### Bibliografia

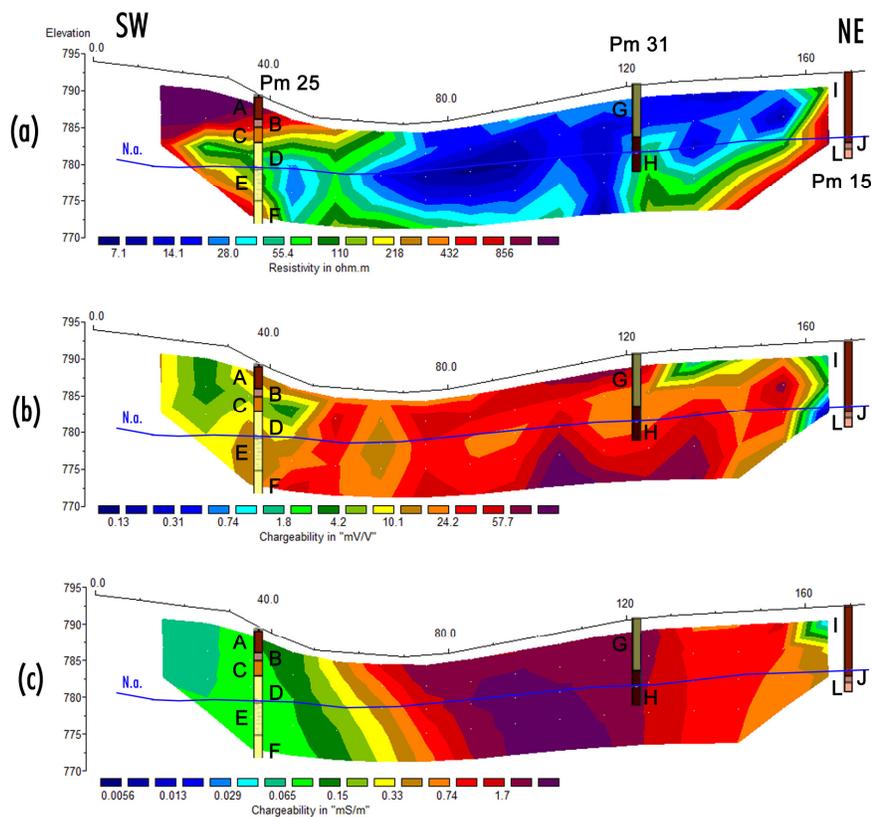
GRIFFITHS, D.H.; BARKER, R.D. & FINCH, J.W. - 1981 - Recent Applications of electrical resistivity and induced

polarization methods to hydrogeological problems. *A Survey of British Hydrogeology 1980*. The Royal Society, London, p. 85-96.

LOKE, M.H. - 2002 - RES2DINV ver. 3.4 - 2D resistivity and IP inversion. Penang: M.H. Loke Software User's Manual, 42p.

SLATER, L.D.; LESMES, D. - 2002 - IP interpretation in environmental investigations. *Geophysics*, v.67, n. 1, p. 77-88.

VELOZO, R. - 2006 - **Caracterização geológico-geotécnica do lixão de São Carlos-SP, com auxílio da geofísica**. Dissertação (Mestrado) - Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 177 p.



#### Legenda

##### Pm 25

- A- ● Areia fina siltosa vermelha
- B- ● Areia fina siltosa vermelho claro
- C- ● Areia fina vermelho/alarmjado
- D- ● Areia fina amarela
- E- ● Areia média com lentes argilosas
- F- ● Areia fina amarela

##### Pm 31

- G- ● Resíduos
- H- ● Areia fina/siltosa negra por influência do chorume

##### Pm 15

- I- ● Areia média vermelha
- J- ● Areia média vermelho claro
- L- ● Areia média rósea

Figura 4 - Linha 3. (a) Resistividade, (b) Cargabilidade e (c) Cargabilidade normalizada.

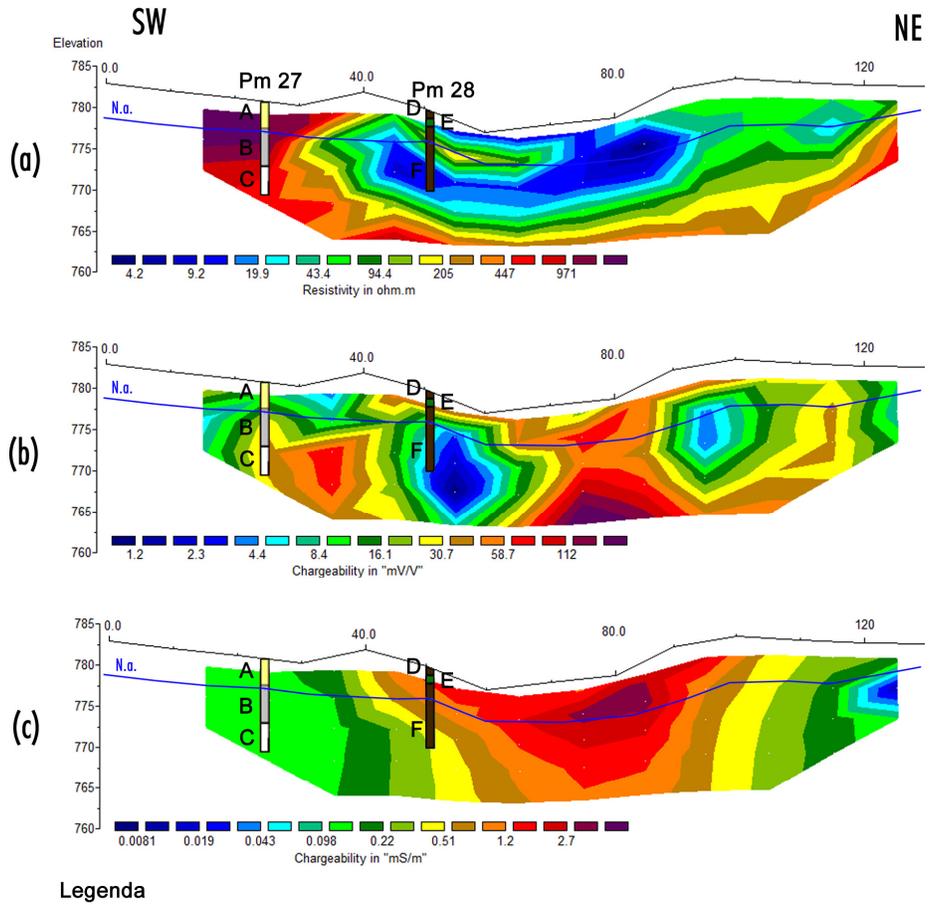


Figura 5 - Linha 1. (a) Resistividade,(b) Cargabilidade e (c) Cargabilidade normalizada.

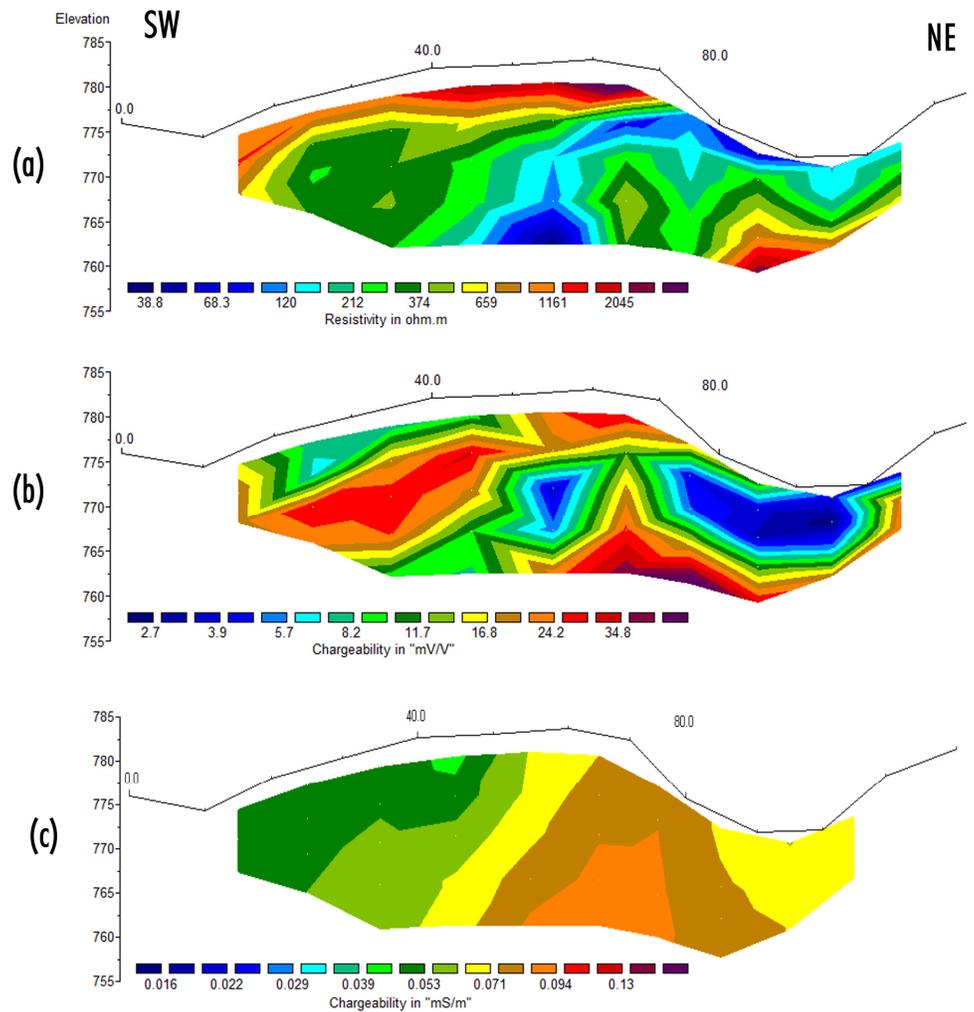


Figura 6 - Linha 0. (a) Resistividade, (b) Cargabilidade e (c) Cargabilidade normalizada.