

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

MÉTODOS GEOELÉTRICOS APLICADOS À AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS
DO EUCALIPTO NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. ESTUDO DE CASO EM RIO
CLARO (SP)

Luis Antonio Galdino Adensohn

Orientador: Prof. Dr. Ricardo César Aoki Hirata
Co-orientador: Geólogo Dr. Fernando Augusto Saraiva

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2013 / 36)

SÃO PAULO
2013

Agradecimentos

Durante muitos anos me iludi com a imagem da Universidade sendo apenas um lugar onde se consegue um diploma para exercer uma profissão com a promessa de ser “alguém na vida”.

Cinco anos após o meu ingresso na Universidade de São Paulo, percebo que o real papel dela não é somente me formar um profissional qualificado. Mas me formar um ser humano com senso crítico. O senso comum está cercado de opiniões não conclusivas, não fundamentadas e isso está tão habitual em nossas vidas que muitas vezes não percebemos.

Hoje, acredito que a universidade tem um papel fundamental não só no desenvolvimento científico, mas também no social. Se por um lado me alegra ter tido oportunidade de viver em um lugar tão perto, me entristece saber que para muitos ainda é algo tão distante. Posso me considerar uma pessoa de sorte.

Por essa razão, ao concluir este Trabalho de Formatura deixo meus sinceros agradecimentos aos que estiveram comigo e me mostraram o quanto é importante o convívio, o diálogo e principalmente a confiança.

Primeiramente gostaria de agradecer ao professor Ricardo César Aoki Hirata. Seus conselhos e orientação foram fundamentais desde o início sempre me indicando um “norte” quando necessário para o desenvolvimento da pesquisa e por me mostrar que a ciência não é algo simples, e quase nunca a resposta está no final do livro.

Agradeço também ao Geólogo Dr. Fernando Augusto Saraiva, pela liberdade que me foi concedida, pelos ensinamentos de campo, pelas conversas e discussões semanais, pela companhia e amizade e principalmente pela paciência. Sua ajuda e estímulo ao longo do projeto foi um dos principais fatores que possibilitaram a conclusão.

Manifesto meu agradecimento especial aos Profs. José Domingos Faraco Gallas e Fábio Taiolli pela ajuda na interpretação dos dados geofísicos e por sempre me atender quando houve necessidade.

Não posso deixar de agradecer a todos os professores do Instituto de Geociências que compartilharam de sua sabedoria para com aqueles que, como eu, engatinham nos estudos do nosso planeta e foram fundamentais na formação de todos os alunos. Em especial: Adriana Alvez, Mário Campos, Paulo Gianinni, Silvio Vlach, Valdecir Janasi, Excelso Ruperti, Gergely Szabó, Renato Morais, Reginaldo Bertolo, Oswaldo Siga Jr., Marly Babinsky, Renato Almeida, Marcos Egydio e Romalino.

Manifesto aqui minha gratidão a toda equipe de profissionais que trabalham no Instituto de Geociências por proporcionarem um dos melhores ambientes de trabalho que eu já presenciei, desde a biblioteca até a cantina. Em especial aos técnicos Paulo Lima e Samuel Egydio que foram essenciais nas campanhas de aquisição geofísica, além de me proporcionarem muitas risadas em Rio Claro.

Também gostaria de agradecer a Vasco Loios pelos ensinamentos, conversas e pela paciência que teve comigo enquanto estive trabalhando no CEPEGEO ao longo do ano de 2012.

Agradeço a todos os meus colegas do LAMO, especialmente a Rafael Terada, cuja parceria foi fundamental para o desenvolvimento da pesquisa, e Paulo Galvão pela ajuda na reta final do trabalho.

O convívio é algo extremamente difícil. Ainda mais quando se vive em uma casa com dez opiniões diferentes. Mas por outro lado ele nos ensina a respeitar uns aos outros e principalmente a criar laços de confiança. Por essa razão eu agradeço a toda a minha “família universitária” Astenosférica (Leonardo Lopes, Saulo Gobbo, Gilberto Jefferson, Vinicius Corrêa, Gabriel Cruz, Gabriel Barbosa, Ivan Martos, Everton Batista, Anderson Pires, Lucas Padoã e Mauricio Bertachini) por todos esses anos de união, parceria e amizade que jamais esquecerei. Vocês me tornaram uma pessoa melhor.

Pelo mesmo motivo, agradeço a todos os meus amigos da turma 52, em especial: Atila Pessoa, Bruno Portela, Caio Sampaio, Fábio Nobre, Gabriel Gonçalves, Pedro Angelini, Renato Villas, Thiago Peres, Tiago Bigola, Victor Sorze e Vinícius Serrano (afinal de contas somos um time). E as meninas Beatriz Benetti, Bruna Pioli, Heloísa Dias, Mariângela Previato e Natalia Hilbert.

Agradeço também aos demais amigos do Instituto de Geociências e Repúblicas (Panapia, Cataveiro e Xenólitos da Asteno), especialmente Diego Silva pela ajuda na reta final do trabalho.

Aos meus amigos de infância e que sempre estiveram comigo mesmo eu estando um pouco mais distante que o normal. Vocês sabem o quanto são importantes pra mim, e sou grato, pois parte do que sou hoje é também graças a vocês: Amaury Guimarães, Fábio Costa, João Rossi, Rafael Queiroz.

Não posso deixar de manifestar meu eterno agradecimento à família Sangiorgue Ucci: Marcia, Waldir, Vinícius e especialmente Marcus, por me mostrar o mundo das geociências. Como minha segunda família, tenho muito que agradecer a todos vocês.

Ao companheirismo, amizade, amor, carinho, paciência, respeito e confiança de Lúcia Garcia. Obrigado por sempre me ajudar nos momentos difíceis e me apoiar quando necessário, sempre me mantendo calmo quando é preciso.

Finalmente agradeço às pessoas que sempre me incentivaram e estiveram ao meu lado fornecendo aquilo que todo o ser humano precisa e que nunca é demais: meus pais (Rose e Luís) e minhas irmãs (Thaís, Mariana e Fernanda). Vocês são as pessoas que mais me apoiaram nas minhas decisões e sempre me proporcionaram conforto. Sem o sacrifício e o incentivo de vocês provavelmente eu não teria chegado aonde cheguei. Como um filho e um irmão sempre vou reconhecer o esforço de vocês, e por isso eu sou eternamente grato.

RESUMO

Métodos geofísicos elétricos tem sido bastante utilizados em estudos hidrogeológicos, especialmente na investigação da profundidade do nível de água e na definição da geometria dos aquíferos, bem como na detecção e dimensionamento de plumas de contaminação. O aumento do teor de umidade e da quantidade de sais dissolvidos causa uma diminuição dos valores de resistividade no solo. Essa condição é que permite a imensa possibilidade de aplicação do método de Eletrorresistividade em estudos ambientais e hidrogeológicos, onde a presença de água na zona saturada pode ser detectada pelo método, bem como a variação da umidade na zona não saturada. O eucalipto é conhecido por ser uma espécie arbórea que absorve significativa quantidade de água da zona não saturada e, em alguns casos, podendo até influenciar na recarga de aquíferos. Nesse contexto, a aplicação do método da Eletrorresistividade, utilizando a técnica do Caminhamento Elétrico, antes e depois do corte de uma plantação de eucalipto adulto, mostrou que os valores de resistividade do solo sofreram aumento. Esse resultado é compatível com o observado pelo monitoramento dos níveis de água no aquífero, medido em uma rede de poços, bem como com o cálculo do balanço hídrico da região, indicando um déficit hídrico nos meses em que as campanhas geofísicas foram realizadas. Sendo assim, o aumento nos valores de resistividade do solo está vinculado apenas às características hídricas e climáticas da região, não sofrendo nenhuma influência do eucalipto, provavelmente porque o período analisado é ainda muito curto. O emprego da técnica da Sondagem Elétrica Vertical e do Potencial Espontâneo permitiu concluir, respectivamente, que o nível d'água apresenta profundidade média em torno de 6,0 m (variando de 1,20 m a 8,0 m) e a direção preferencial de fluxo subterrâneo segue para o norte da área, compatível com o observado pela rede de monitoramento.

ABSTRACT

Electrical geophysical methods have been widely used in hydrogeological studies, especially to investigate groundwater level and to define the geometry of aquifers, as well in the detection and sizing of contamination plumes. The increasing in moisture content and the amount of dissolved salts results in the decreasing of the resistivity values on soil. This condition allows a vast possibility of uses of the Electrical Resistivity Method in hydrogeological and environmental studies where the presence of water in the saturated zone may be detected, as well as the moisture alteration in the unsaturated zone. The eucalyptus is known as a tree species that absorbs a significant amount of water from the unsaturated zone and, in some cases, may even affect the recharge of aquifers. In this context, the application of the Electrical Resistivity Method, using the Electrical Profiling Technique, before and after the cutting of an adult eucalyptus crop, showed that the resistivity of the soil has increased. This result is consistent with the groundwater measurements observed by monitoring water levels in the aquifer, in a network of wells, as well as the calculation of the water balance of the region, indicating water deficit in months that the geophysical campaigns were conducted. Thus, the increasing in resistivity of the soil is related only to the water and climatic characteristics of the region, showing no influence of eucalyptus, probably because the analyzed period was too short. The use of Vertical Electrical Sounding and Spontaneous Potential concluded, respectively, that the water level has an average depth of around 6.0 m (ranging from 1.20 m to 8.0 m) and the main direction of groundwater flow heads to the north of the area, according with measured in the monitoring network.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	2
3. OBJETIVOS.....	3
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
4.1 Contexto Geológico e Hidrogeologia.....	3
4.2 Geofísica.....	6
4.2.1 <i>Eletroresistividade</i>	6
4.2.1.1 <i>Caminhamento Elétrico (CE)</i>	7
4.2.1.2 <i>Sondagem Elétrica Vertical (SEV)</i>	9
4.2.2 <i>Potencial Espontâneo (SP)</i>	10
4.3 Trabalhos Anteriores.....	13
5. MATERIAIS E MÉTODOS.....	15
5.1 Caminhamento Elétrico (CE).....	15
5.2 Sondagem Elétrica Vertical (SEV).....	18
5.3 Potencial Espontâneo (SP).....	20
5.4 Execução de Sondagens.....	21
5.5 Balanço Hídrico.....	22
6. RESULTADOS OBTIDOS.....	23
6.1 Caminhamento Elétrico (CE).....	23
6.2 Sondagem Elétrica Vertical (SEV).....	28
6.3 Potencial Espontâneo (SP).....	33
6.4 Execução de Sondagens.....	35
6.5 Balanço Hídrico e medições do nível d'água.....	37

7. INTERPRETAÇÃO DOS DADOS E DISCUSSÃO.....	41
7.1 Caminhamento Elétrico (CE).....	41
7.2 Sondagem Elétrica Vertical (SEV).....	46
7.3 Potencial Espontâneo (SP).....	47
8. CONCLUSÕES.....	48
9. BIBLIOGRAFIA.....	50

Lista de Figuras

Figura 1 – Mapa do Estado de São Paulo, Oliva (2006). Mapa da Área de Estudo (com coordenadas UTM), sobre imagem Google Earth.....	2
Figura 2 – Mapa geológico da bacia hidrográfica do Rio Corumbataí com foco na área de estudo.....	5
Figura 3 – Parâmetros da definição de resistividade, adaptado de Kearey et al. (2002).....	6
Figura 4 – Arranjo Dipolo-Dipolo. Modificado de Gallas (2000).....	8
Figura 5 – Arranjo dipolo-dipolo com várias profundidades de investigação. Gallas (2000).....	8
Figura 6 – Esquema de arranjo da Sondagem Elétrica Vertical. Modificado de Braga (2006).....	9
Figura 7 – Arranjo Schlumberger. Gallas (2000).....	10
Figura 8 – Potenciais de Fluxo, fenômeno “per descensum” . . Modificado de Saraiva (2010).....	11
Figura 9 – Configuração da Técnica dos Gradiente. Modificado de Gallas (2000).....	12
Figura 10 – Configuração da Técnica dos Potenciais (ou base fixa). Modificado de Gallas (2000).....	12
Figura 11 – Disposição das linhas de Caminhamento Elétrico.....	16
Figura 12 – Curvas de nível e poços instalados em campanhas anteriores.....	17
Figura 13 – Disposição das SEV ao longo de toda área de estudo.....	19
Figura 14 – Perfis de resistividade referentes à Linha 1 das campanhas de julho/2013 e setembro/2013. Software RES2DINV.....	25
Figura 15 – Perfis de resistividade referentes à Linha 2 das campanhas de julho/2013 e setembro/2013. Software RES2DINV.	25
Figura 16 – Perfis de resistividade referentes à Linha 3 das campanhas de julho/2013 e Setembro/2013. Software RES2DINV.	26
Figura 17 – Perfis de resistividade referentes à Linha 4 das campanhas de julho/2013 e setembro/2013. Software RES2DINV.	26
Figura 18 – Perfis de resistividade referentes à Linha 5 das campanhas de julho/2013 e setembro/2013. Software RES2DINV.	27
Figura 19 – Perfis de resistividade referentes à Linha 6 das campanhas de julho/2013 e setembro/2013. Software RES2DINV.	27
Figura 20 – Curva da SEV 1 com os respectivos valores encontrados em profundidade.....	28
Figura 21 – Curva da SEV 2 com os respectivos valores encontrados em profundidade.....	29
Figura 22 – Curva da SEV 3 com os respectivos valores encontrados em profundidade.....	29
Figura 23 – Curva da SEV 4 com os respectivos valores encontrados em profundidade.....	30

Figura 24 – Curva da SEV 5 com os respectivos valores encontrados em profundidade.....	30
Figura 25 – Curva da SEV 6 com os respectivos valores encontrados em profundidade.....	31
Figura 26 – Curva da SEV 7 com os respectivos valores encontrados em profundidade.....	31
Figura 27 – Curva da SEV 8 com os respectivos valores encontrados em profundidade.....	32
Figura 28 – Curva da SEV 9 com os respectivos valores encontrados em profundidade.....	32
Figura 29 – Curva da SEV 10 com os respectivos valores encontrados em profundidade.....	33
Figura 30 – Mapa de pontos com as curvas de isovalores em milivolts (mV). Software SURFER versão 9.....	34
Figura 31 – Mapa de potencial espontâneo com escala cromática de potencial (mV). Software SURFER versão 9.....	34
Figura 32 – Perfil geológico esquemático ao longo da linha 1 do caminhamento elétrico.....	36
Figura 33 – Gráfico do balanço hídrico (janeiro/2013 a setembro/2013) e histograma com a variação da precipitação total mensal e a temperatura média mensal.....	38
Figura 34 – Medições do nível d'água em campanhas realizadas entre abril e setembro de 2013. Quando as linhas são interrompidas é porque o poço estava seco.....	40
Figura 35 – Perfis de resistividade referentes à Linha 1 das campanhas de julho/2013 e setembro/2013. Software SURFER versão 9.....	42
Figura 36 – Perfis de resistividade referentes à Linha 2 das campanhas de julho/2013 e setembro/2013. Software SURFER versão 9.....	42
Figura 37 – Perfis de resistividade referentes à Linha 3 das campanhas de julho/2013 e setembro/2013. Software SURFER versão 9.....	43
Figura 38 – Perfis de resistividade referentes à Linha 4 das campanhas de julho/2013 e setembro/2013. Software SURFER versão 9.....	44
Figura 39 – Perfis de resistividade referentes à Linha 5 das campanhas de julho/2013 e setembro/2013. Software SURFER versão 9.....	44
Figura 40 – Perfis de resistividade referentes à Linha 6 das campanhas de julho/2013 e setembro/2013. Software SURFER versão 9.....	45
Figura 41 – Mapa potenciométrico sobre imagem Google Earth®.....	48

Lista de Fotos

Foto 1 – Resistivímetro Multieletrodo marca IRIS modelo Syscal Swith Pro®.....	15
Foto 2 – Arranjo dos eletrodos em campo (perfil referente à Linha 10 com dipolo de 2,50 m, realizado em Setembro de 2013).....	16
Foto 3 – Equipamento Resistivímetro Terrameter ABEM Modelo SAS 300B.....	18
Foto 4 – Arranjo Schumblerger em campo.....	19
Foto 5 – Eletrodo “Base-fixa” em campo.....	20
Foto 6 – Execução da Sondagem ST-2 dentro da área correspondente ao plantio de eucalipto.....	21

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Dados construtivos dos poços de monitoramento.....	17
Tabela 2 – Característica das sondagens executadas ao longo da linha 1 do caminhamento elétrico.....	21
Tabela 3 – Resumo da descrição litológica referente às sondagens executadas na área.....	35
Tabela 4 – Valores de nível d'água medidos entre abril e setembro de 2013.....	39
Tabela 5 – Relação entre as profundidades dos estratos geoeletricos e o nível d'água aparente.....	46
Tabela 6 – Profundidade do N.A medido em relação aos detectados pelas SEV próximas a alguns poços de monitoramento.....	47

Lista de Apêndice

Apêndice 1 - Tabelas com os valores de resistividade obtidos através das sev e coordenadas (utm).....	53
Apêndice 2 - Tabela com os valores de Potencial Espontâneo medidos em campo (mv) e coordenadas (UTM).....	59
Apêndice 3 - Tabela com os dados utilizados para o cálculo do balanço hídrico.....	61

1. INTRODUÇÃO

Em estudos hidrogeológicos, as técnicas geofísicas têm tido notória aplicabilidade quando é necessário avaliar profundidades do nível d'água dos aquíferos, direções preferenciais de fluxos subterrâneos e também detecção e dimensionamento espacial de plumas de contaminação.

Dentre os métodos geofísicos de exploração, os elétricos estão cada vez mais sendo utilizados em estudos hidrogeológicos uma vez que apresentam boa resolução e custo relativamente baixo. Outro fator importante quando se utilizam estes métodos, é em relação ao tempo gasto para obter os dados necessários sendo, na maioria das vezes, mais rápido que os métodos convencionais de investigação, denominados métodos diretos (Saraiva, 2010).

Segundo Gallas (2000), o aumento do teor de umidade e da quantidade de sais dissolvidos causa uma diminuição dos valores de resistividade do solo. Essa condição é que permite a imensa possibilidade de aplicação do método de Eletrorresistividade em estudos ambientais e hidrogeológicos, onde a presença de água na zona saturada pode ser detectada pelo método, bem como a variação da umidade na zona não saturada.

O Potencial Espontâneo tem sua principal aplicação no estudo do comportamento do fluxo de águas em subsuperfície. As anomalias de SP são geradas pelo fluxo de fluidos, de calor ou de íons no subsolo. Tem mostrado resultados satisfatórios quando necessário localizar e delimitar esses fluxos e suas fontes associadas (Gallas, 2000).

Poucos são os trabalhos que utilizam métodos geofísicos com o objetivo de comparar a influência de espécies arbóreas nas zonas saturadas e não saturadas de um sistema aquífero. Dentre essas espécies, pode-se citar o eucalipto.

O eucalipto é conhecido por ser uma espécie arbórea que absorve significativa quantidade de água da zona não saturada e, em alguns casos, podendo até influenciar na recarga de aquíferos.

Sendo assim, neste trabalho, será investigada a mudança na umidade do solo de um aquífero livre, através da técnica do Caminhamento Elétrico (CE) e também a profundidade do nível d'água utilizando a técnica de Sondagem Elétrica Vertical (SEV).

O emprego das técnicas eletrorresistivas e do potencial espontâneo são de extrema importância para entender o comportamento do aquífero, comparar os resultados obtidos com os dados de investigação direta e avaliar a influência que espécies arbóreas que absorvem significativa quantidade de água, como o eucalipto, exercem na zona saturada e não saturada de um sistema aquífero.

2. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada na zona rural do Município de Rio Claro (Estado de São Paulo), distando 173 km da capital com acesso pelas rodovias Anhanguera-Bandeirantes (SP-330) e Washington Luiz (SP-310) (Figura 1).

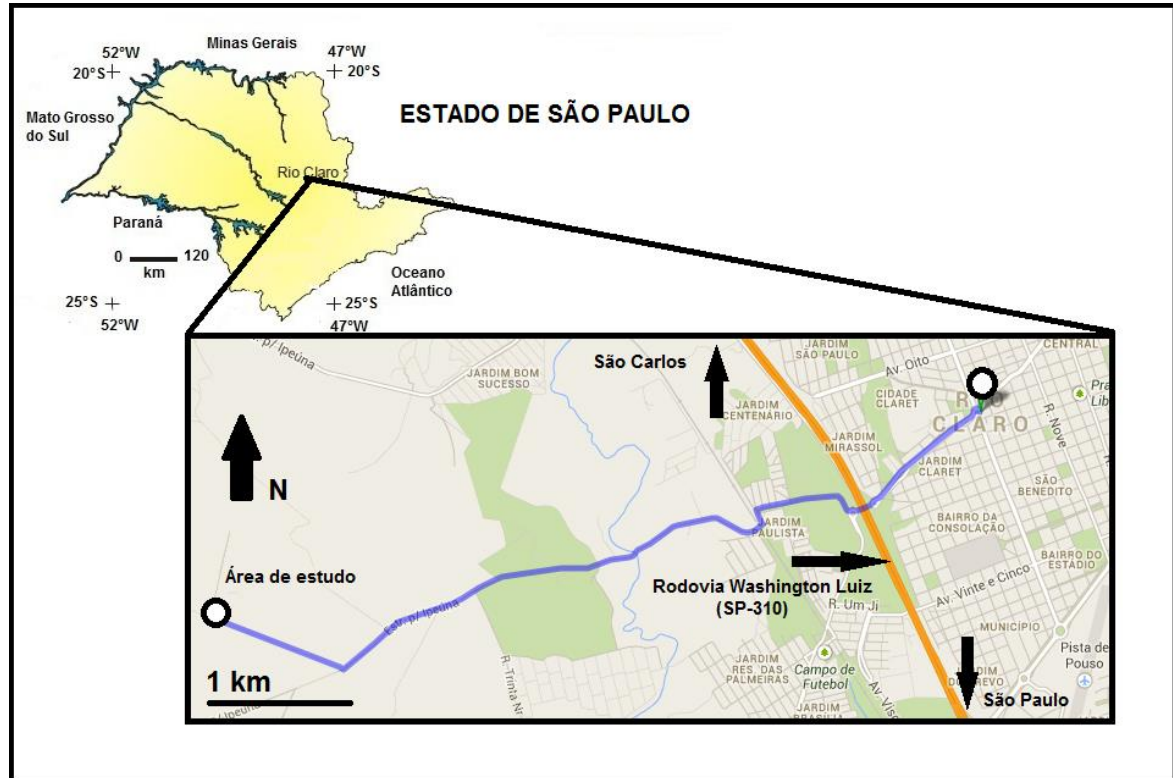


Figura 1 – Mapa do Estado de São Paulo, Oliva (2006). Mapa da Área de Estudo (com coordenadas UTM) sobre imagem Google Earth®.

3. OBJETIVOS

O objetivo do trabalho consiste em utilizar métodos geofísicos elétricos, como o Potencial Espontâneo (SP) e a Eletroresistividade através das técnicas de Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e Caminhamento Elétrico (CE), para identificar a profundidade e direção do fluxo das águas subterrâneas e avaliar a influência que o eucalipto exerce nas zonas não saturada e saturada do sistema aquífero local, utilizando a Eletroresistividade como técnica principal. Para avaliar a eficiência dos métodos, compararam-se os resultados geofísicos com os obtidos através de investigação direta realizada por meio de poços de monitoramento existentes na área.

Inicialmente este Trabalho de Formatura tinha como objetivo avaliar o comportamento de uma pluma de contaminação de nitrato sob uma plantação de eucaliptos através dos métodos geoeletricos, dentro do contexto do projeto “Fitorremediação de Nitrato em Aquífero Freático com uso de Eucalipto – FITOREM”. Entretanto, devido a dificuldades de operação do projeto e do corte do eucalipto na área de estudo, foi se obrigado a reduzir o escopo deste Trabalho de Formatura somente às questões hidráulicas do aquífero.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Contexto Geológico e Hidrogeologia

A área de estudo localiza-se na zona rural do município de Rio Claro (SP) onde afloram sedimentos da Formação Rio Claro, porção estratigraficamente superior da Bacia do Paraná.

A Bacia do Paraná é uma unidade intracratônica com sucessão sedimentar-magmática, com idades desde o período neo-ordoviciano da era paleozóica, até o período neo-cretáceo, da era mesozoica, e ocupa uma região de aproximadamente 1,5 milhão de quilômetros quadrados, exibindo forma ovalada com eixo maior em posição submeridiana (Milani, 2004).

Na região estudada, o Grupo Itararé, de idade permo-carbonífero, representa a unidade basal da sequência estratigráfica sobreposta pela Formação Tatuí, de idade neo-permiana. Essas duas sequências de rochas formam o Supergrupo Tubarão (Zaine, 1994). Sobreposto a esta unidade está o Grupo Passa Dois, que compreende as formações Irati e Corumbataí, ambas de idade neo-permiana (Schneider et al., 1974). Acima deste encontra-se o Grupo São Bento, uma sequência triássico-cretácica, que compreende os paleodesertos das formações Pirambóia e Botucatu e os basaltos da Formação Serra Geral.

Recobrimo em parte essas unidades descritas, encontram-se os depósitos cenozoicos que constituem extensas áreas no Estado de São Paulo e onde está inserida a Formação Rio Claro (Bjornberg & Landim, 1966).

A Formação Rio Claro apresenta espessuras em geral pequenas, não ultrapassando 30 m (Freitas et al., 1979). São constituídas por sucessões de estratos arenosos com intercalações subordinadas de leitos argilosos em sua base, e por sedimentos argilosos, com brechas intraformacionais e lentes arenosas subordinadas em seu topo (Fúlfaro & Suguio, 1968).

Na área de estudo, a Formação Rio Claro aparece em contato erosional com as formações Corumbataí e Pirambóia (Figura 2). A primeira compreende siltitos e argilitos de coloração roxa, localmente com níveis arenosos, e que quando intemperizados apresentam-se “empastilhados”. A segunda apresenta arenitos de origem flúvio-eólica com estratificações cruzadas de médio porte (Milani, 2004).

A Formação Pirambóia faz parte hidraulicamente do Sistema Aquífero Guarani e se apresenta como um excelente aquífero. Em sua área de exposição, é um aquífero livre e de rápida circulação das águas. Já a Formação Corumbataí forma regionalmente um aquitarde, devido à baixa permeabilidade de suas rochas.

Segundo DAEE (1981) o município de Rio Claro apresenta dois principais sistemas de águas subterrâneas podendo ser divididos em: aquífero livre (constituído por sedimentos da Formação Rio Claro) e confinado (constituído por sedimentos do Grupo Tubarão). O aquífero correspondente ao tema deste presente trabalho é o aquífero livre. Este aquífero é pouco profundo, com espessura média em torno de 30 m e apresenta vazões entre 5 m³/h e 25 m³/h. A transmissividade varia de 2 a 50 m²/dia, a permeabilidade aparente é menor que 2 m/dia e a capacidade específica altera entre 0,1 a 5 m³/h/m.

Segundo Oliva (2006) a espessura da zona saturada da Formação Rio Claro apresenta ampla variação entre 2 a 30 m com predomínio de espessuras entre 16 a 18 m. Com relação à espessura das zonas não saturada, elas variam de 2 a 25 m, prevalecendo valores entre 8 a 14 m. As áreas de recarga se expandem a toda a área de afloramento e as de descarga geralmente se associam aos rios e drenagem superficiais podendo também alimentar unidades aquíferas inferiores.

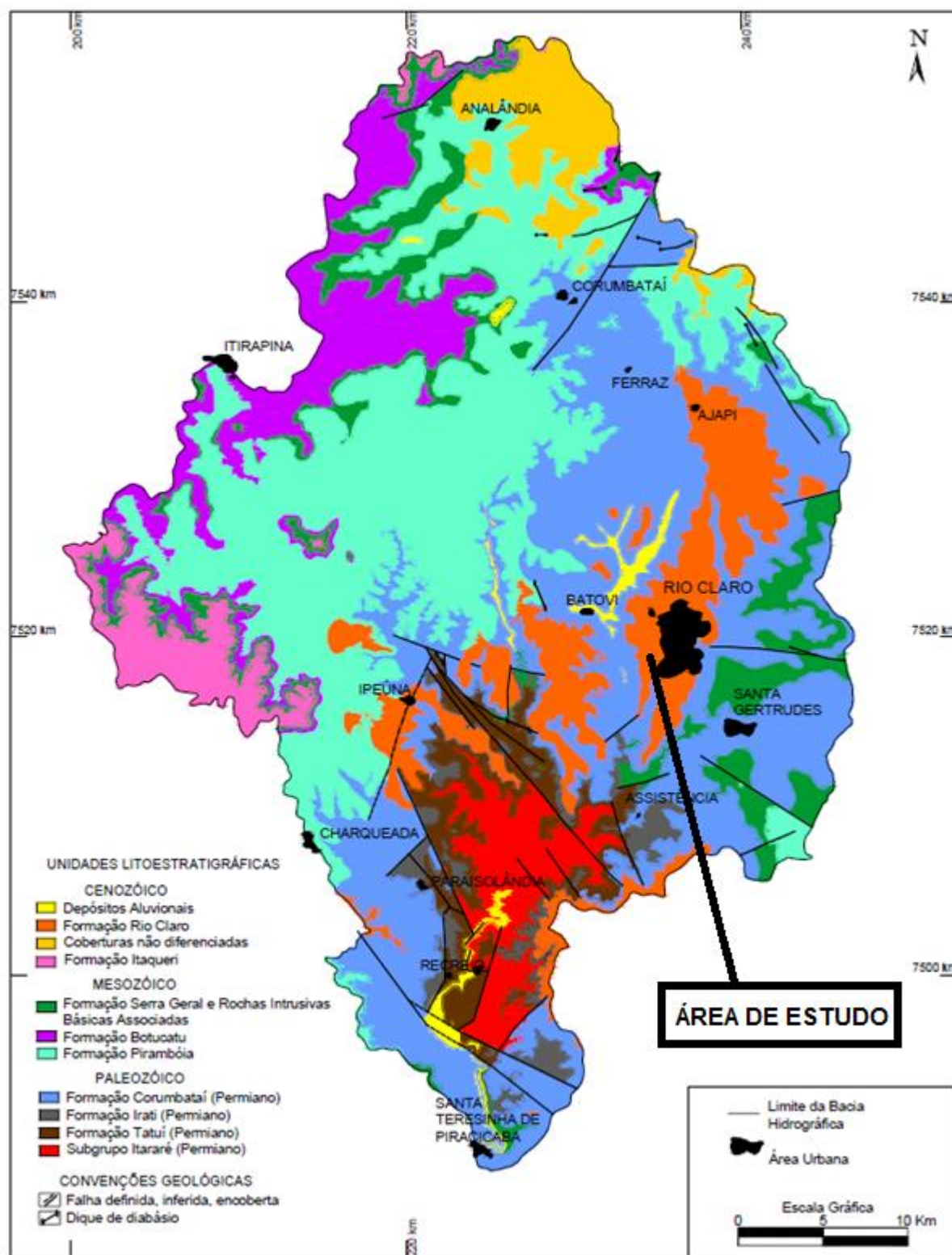


Figura 2 – Mapa geológico da bacia hidrográfica do Rio Corumbataí com foco na área de estudo. Fonte: Oliva (2006).

4.2 Geofísica

Os métodos geofísicos utilizados no projeto são: Eletrorresistividade, através das técnicas de sondagem elétrica vertical (SEV) e caminhamento elétrico (CE), e o Potencial Espontâneo (SP), para os quais é apresentada sucintamente a base teórica.

4.2.1 Eletrorresistividade

Certos minerais, como metais nativos e grafite, conduzem eletricidade via passagem de elétrons. A maior parte dos minerais formadores de rocha é, entretanto, isolante, e a corrente elétrica é conduzida através de uma rocha principalmente pela passagem de íons dissolvidos nas águas dos poros e fissuras (Kearey et al., 2002).

Sendo assim, conclui-se que o principal fator de influência e controle da resistividade da rocha é a porosidade, bem como a quantidade de água contida nos poros e a sua salinidade.

A resistividade de um material é definida como a resistência entre faces opostas de um cubo unitário do material. Nada mais é que a medida da dificuldade que a corrente elétrica encontra ao passar através de um material. Em um cilindro condutor (Figura 3), a resistividade é dada pela equação,

$$\rho = (R.A) / L$$

onde ρ é a resistividade em ohm.m, R é a resistência do material, A é área da seção transversal e L o comprimento.

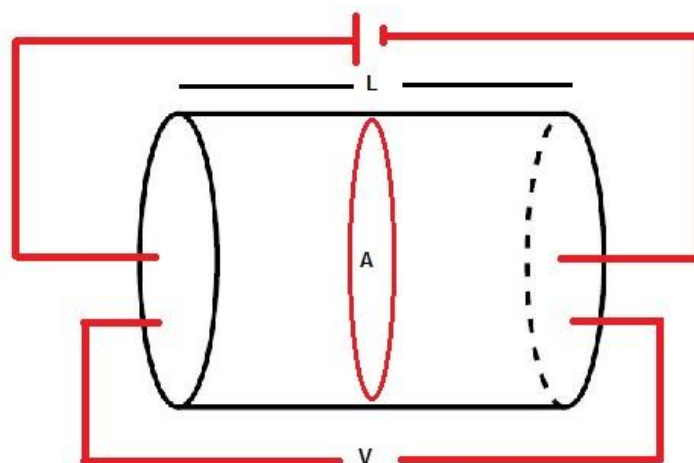


Figura 3 – Parâmetros da definição de resistividade, adaptado de Kearey et al. (2002).

Telford et al. (1990) cita que ao empregar uma corrente elétrica artificial através de dois eletrodos (A e B) introduzidos no terreno, visando medir o potencial gerado em outros dois eletrodos (M e N) nas proximidades do fluxo de corrente, pode-se calcular a resistividade aparente através da expressão:

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

onde ρ é a resistividade elétrica (ohm.m), K é o fator geométrico que depende das posições dos eletrodos no terreno, ΔV é a diferença de potencial entre os eletrodos M e N e I a intensidade de corrente que passa entre os eletrodos A e B.

O fator K pode ser calculado através da equação geral:

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

Segundo Gallas (2000), o aumento do teor de umidade e da quantidade de sais dissolvidos causa uma diminuição dos valores de resistividade. Essa condição é que permite a imensa possibilidade de aplicação do método em estudos ambientais e hidrogeológicos, onde a presença de água da zona saturada e o aumento da quantidade de contaminantes ricos em sais podem ser detectados pelo método, sem a necessidade de alto custo de um extenso programa de perfuração.

4.2.1.1 Caminhamento Elétrico (CE)

O objetivo do Caminhamento Elétrico é determinar as variações laterais na condutividade elétrica do terreno estudado (Parasnis, 1986). Em casos ambientais, esta técnica pode ser utilizada para diagnosticar estruturas verticais presentes ao longo de uma linha de caminhamento e possíveis contaminações no aquífero.

Dentre os arranjos utilizados na técnica pode-se citar o arranjo Dipolo-Dipolo. Neste arranjo, os eletrodos A e B de envio de corrente e os eletrodos M e N de potencial ou de recepção são alinhados sobre um mesmo perfil (Figura 4).

O arranjo é definido pelos espaçamentos $L = AB = MN$. A profundidade de investigação cresce com L e teoricamente corresponde a L, $3/2L$, $2L$, ..., $((n+1)/2)L$ como mostra a figura 5.

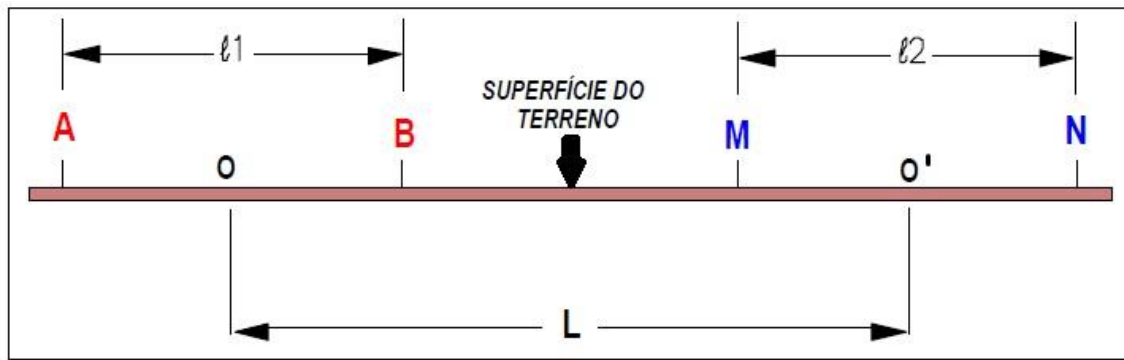


Figura 4 – Arranjo Dipolo-Dipolo. Modificado de Gallas (2000).

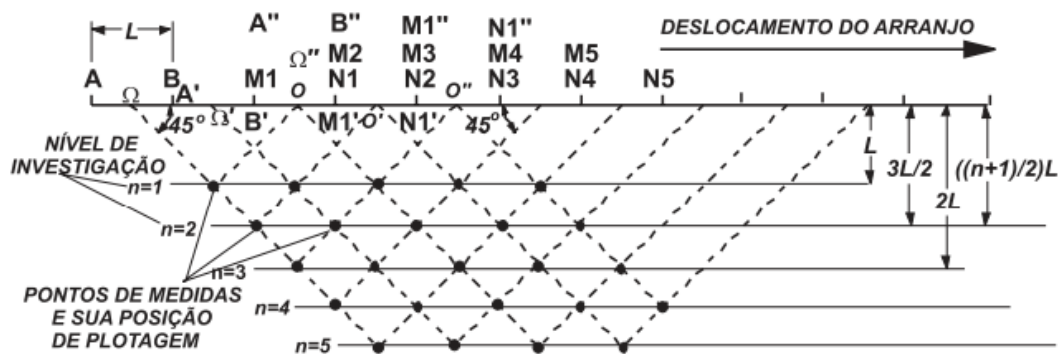


Figura 5 – Arranjo dipolo-dipolo com várias profundidades de investigação, Gallas (2000).

Comumente, as medidas são realizadas em várias profundidades de investigação, isto é, $n = 1, 2, 3, 4$ e 5 , e atribuídas na intersecção das linhas que partem a 45° dos centros de AB ($\Omega, \Omega', \Omega'' \dots$) e MN ($O, O', O'' \dots$). A cada estação, os dois dipolos são deslocados a uma distância igual a L , e os dados obtidos são plotados nas posições $n = 1, 2, 3, \dots$ e interpolados, gerando uma pseudo-seção de resistividade aparente.

Para o arranjo em questão a profundidade de penetração ou investigação obtida com o programa de inversão é da ordem de 21% da abertura máxima dos eletrodos (A-N), já que o software se utiliza do algoritmo baseado no trabalho de Edwards (1977) (apud Saraiva, 2010).

A cada ponto de medida os dipolos são deslocados de uma distância igual a X , os dados obtidos são plotados nas posições $n = 1, 2, 3, 4$ e 5 e interpolados, gerando uma pseudo-seção de resistividade aparente.

Após o devido tratamento (inversão) dos dados, nas pseudo-seções obtidas deverão ser observadas as variações de resistividade aparente para uma ou mais profundidades. Essas seções permitirão uma interpretação qualitativa das variações de resistividade.

4.2.1.2 Sondagem Elétrica Vertical (SEV)

A técnica SEV tem como objetivo determinar a variação da condutividade elétrica com a profundidade da área estudada (Orellana, 1972). Pode ser aplicada em estudos ambientais para identificação do nível freático.

Essa técnica consiste em injeção de corrente elétrica no solo através de um par de eletrodos em contato galvânico com o solo e outro par é utilizado para medir a diferença de potencial gerada pelo fluxo de corrente conforme sugere a figura 6.

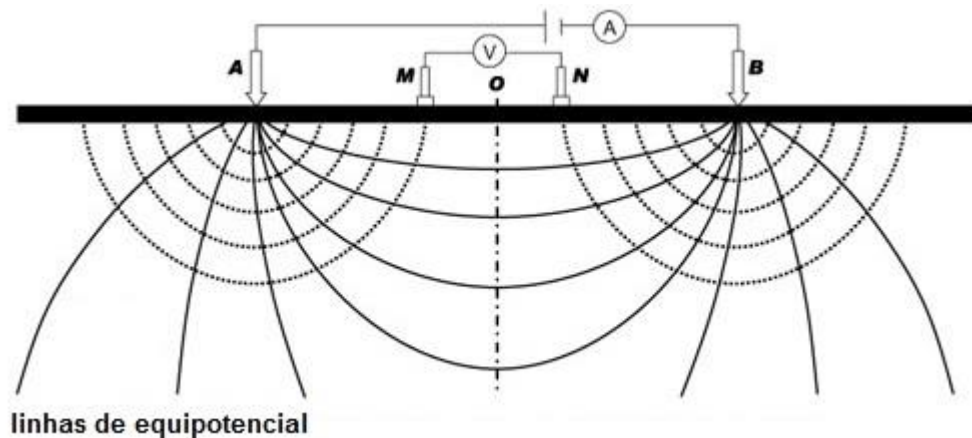


Figura 6 – Esquema de arranjo da Sondagem Elétrica Vertical com enfoque para os eletrodos de emissão de corrente (A e B) e os de medição de diferença de potencial (M e N). Modificado de Braga (2006).

Os mais comuns arranjos elétricos em contato com o solo utilizados na SEV são: Schlumberger e Wenner. Para este tipo de sondagem em específico, o arranjo Schlumberger tem sido utilizado com maior frequência por apresentar vantagens em relação ao arranjo Wenner (Orellana, 1972).

Segundo Gallas (2000), no arranjo Schlumberger usam-se dois eletrodos para a transmissão de corrente A e B e dois eletrodos de potencial M e N alinhados sobre um mesmo perfil. À medida que se expande a abertura (L) entre os eletrodos A e B, aumenta a profundidade investigada. O centro “O” é fixo e a abertura entre os eletrodos M e N deve ser mantida constante o máximo possível (Figura 7).

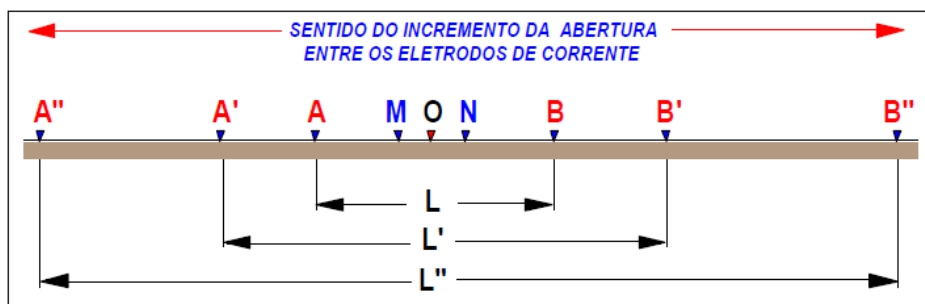


Figura 7 – Arranjo Schlumberger. A e B: eletrodos para transmissão de corrente; M e N: eletrodos de potencial alinhados sobre o mesmo perfil; O: eletrodo fixo; L: abertura (em metros). Gallas (2000).

Os dados de resistividade aparente, obtidos em cada SEV, são representados por meio de uma curva, de acordo com as distâncias entre os eletrodos, e são processados com a utilização de ábacos e programas automáticos de inversão.

4.2.2 Potencial Espontâneo (SP)

O método SP, em casos ambientais, tem sua principal aplicação no estudo do comportamento do fluxo de águas em subsuperfície. As anomalias de SP são geradas pelo fluxo de fluidos, de calor ou de íons no subsolo, e seu estudo tem sido útil para localizar e delimitar esses fluxos e suas fontes associadas (Gallas, 2000).

Segundo Parasnis (1986), o método SP é baseado na medição das diferenças de potenciais elétricos naturais que existem entre dois pontos quaisquer na superfície do terreno, mesmo na ausência de qualquer campo elétrico criado artificialmente, através da introdução de eletrodos. A origem do potencial espontâneo no estudo de fluxos de água subterrânea está vinculada com o mecanismo de eletrofiltração ou eletrocinese.

O mesmo autor, assim como Orellana (1972), cita que a eletrofiltração é o mecanismo que consiste na produção de um campo elétrico que é desenvolvido pelo movimento de eletrólitos (água subterrânea) no subsolo. Quando um eletrólito passa através de uma membrana porosa, é produzida dos dois lados desta membrana uma diferença de potencial. Podemos comparar a membrana porosa com as rochas e os poros da rocha como uma rede de tubos capilares por onde a água subterrânea escoar.

As paredes dos tubos capilares absorvem os ânions, os quais atraem cátions, formando uma capa elétrica dupla. Os ânions permanecem fixos, porém os cátions são arrastados pelo fluxo da água subterrânea gerando uma diferença de potencial em combinação com as desiguais velocidades de fluxo de íons positivos e negativos que obedece a equação de Helmholtz:

$$\Delta V = \frac{\zeta \varepsilon P}{\eta \sigma}$$

Onde:

ζ = diferença de potencial na dupla camada; ε = constante dielétrica; σ = condutividade; η = viscosidade do eletrólito; P = diferença de pressão hidrostática entre os extremos do capilar - responsável pelo movimento do eletrólito.

Normalmente utiliza-se visando determinar os movimentos de água subterrânea, uma vez que o fluxo dos íons presentes na água gera anomalias, sendo possível localizar e delinear estes fluxos e as fontes associadas.

Segundo Schlumberger (1929) (apud Orellana, 1972), dois tipos de eletrofiltração são conhecidos: “per ascensum” e “per descensum”. O primeiro depende da pressão que faz as águas subterrâneas subirem. Quando um eletrodo é introduzido em um terreno escavado recentemente e o outro em um não escavado, o fenômeno ocorre devido à ascensão de umidade para as camadas superficiais, e existem diferenças de potencial de algumas dezenas de mV causado pelo aumento de evaporação capilar do solo escavado recentemente. O segundo corresponde à infiltração de água através de terrenos permeáveis ou ao longo de fraturas/falhas nas rochas (Figura 8). Como a água tende a remover os íons positivos das paredes dos tubos capilares, aparecem anomalias negativas nos locais pouco saturados e anomalias positivas nos locais saturados.

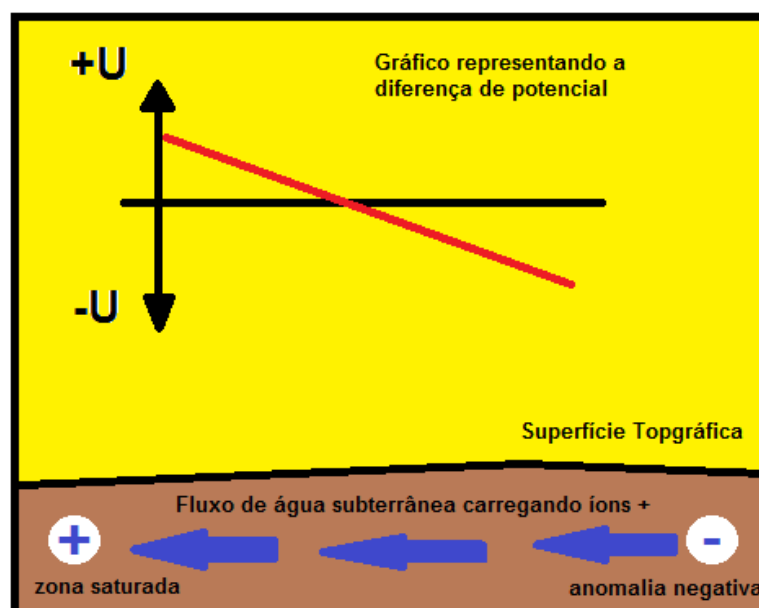


Figura 8 – Potenciais de Fluxo, fenômeno “per descensum”. Geração de anomalia negativa em zonas não saturadas. Grande quantidade de íons positivos removidos das paredes dos tubos capilares e transportados pelo fluxo de água subterrânea para zonas saturadas. Modificado de Saraiva (2010).

Duas técnicas podem ser empregadas no método do Potencial Espontâneo. A primeira corresponde à Técnica dos Gradientes que, segundo Gallas (2000), consiste em medir sucessivamente as diferenças de potencial entre dois pontos contíguos de um perfil, através de dois eletrodos (M e N) que são deslocados através de um perfil de medidas (caminho a ser feito pelo operador), normalmente em intervalos iguais (Figura 9).

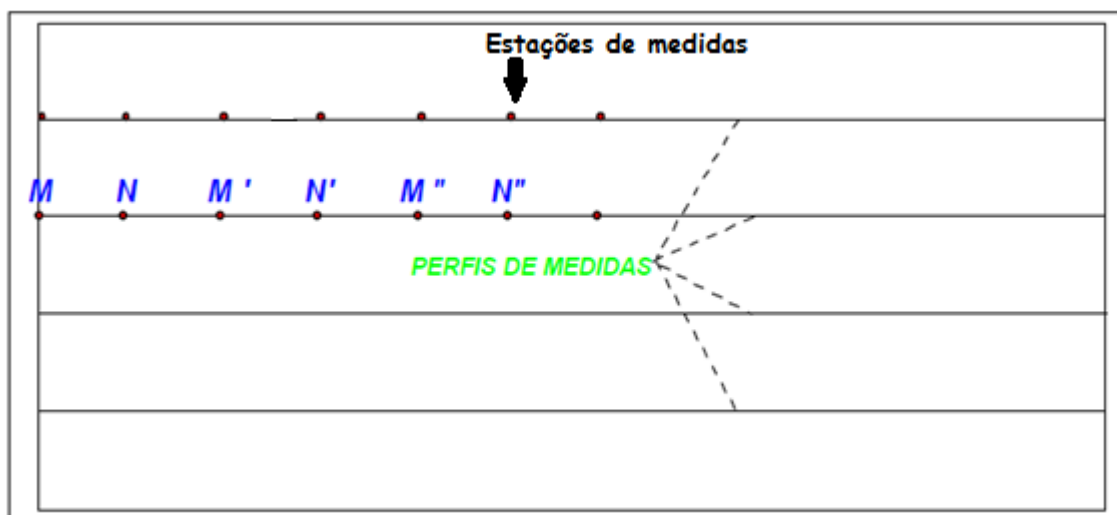


Figura 9 – Figura em planta da configuração da Técnica dos Gradiente. M e N são os pares de eletrodos e as linhas (perfis de medidas) o deslocamento feito pelos eletrodos. Modificado de Gallas (2000).

A segunda técnica corresponde a Técnica dos Potenciais (ou base fixa). O mesmo autor cita que esta técnica requer que um dos eletrodos seja mantido fixo (M) em uma estação-base, enquanto o outro (N) percorre os pontos de medidas nos perfis de medida (caminho a ser feito pelo operador) (Figura 10).

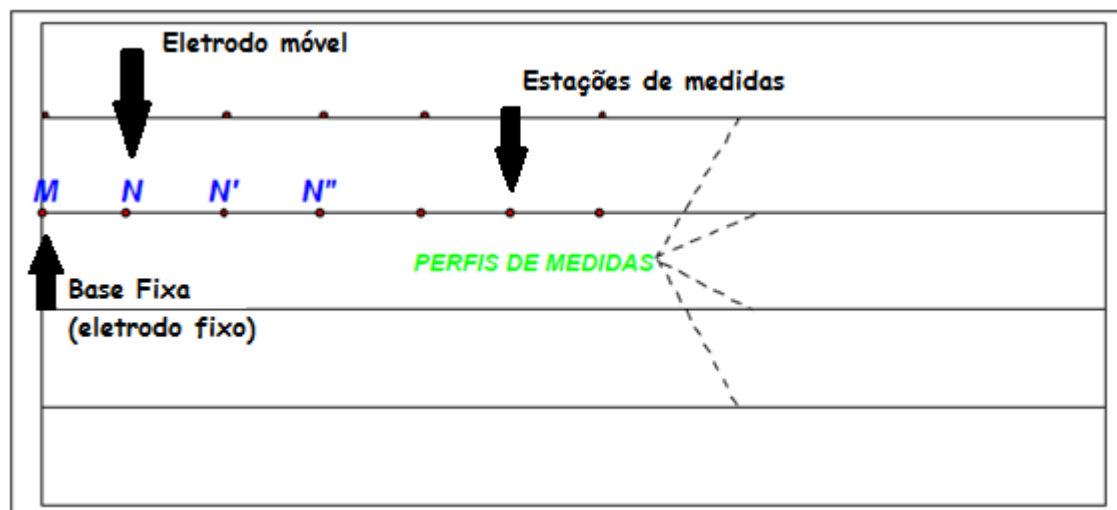


Figura 10 – Figura em planta da configuração da Técnica dos Potenciais (ou base fixa). M é o eletrodo “estação-base” e N é o eletrodo móvel que se desloca ao longo dos perfis de medidas representados pelas linhas. Modificado de Gallas (2000).

Segundo Gallas (2000), a Técnica dos Potenciais possui vantagens em relação à Técnica dos Gradientes por diminuir erros acumulativos gerados por contatos solo/eletrodo, polarização de eletrodos e derivas de potencial com o tempo. Sendo assim, comumente utiliza-se da Técnica de Potenciais em relação à Técnica dos Gradientes.

4.3 Trabalhos Anteriores

Diversos são os trabalhos científicos que abordam temas como a hidrogeologia e geofísica, principalmente quando se utiliza dos métodos elétricos de Potencial Espontâneo e Eletroresistividade.

Um dos principais trabalhos envolvendo estudos hidrogeológicos e métodos geofísicos elétricos no Aquífero Rio Claro foi realizado por Oliva (2006). Neste trabalho foram utilizadas as técnicas de Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e Imageamento Elétrico. O objetivo principal do trabalho era o estudo hidrofaciológico do Aquífero Rio Claro. Por meio de levantamento geofísico foi possível identificar e delimitar as litofácies que constituem o aquífero, de maneira a estabelecer uma subdivisão das unidades geoeletricas. Com base nesta subdivisão, foram elaborados mapas de resistividade em escalas de município e de detalhe, com intuito de verificar a distribuição espacial das eletrofácies presentes no Aquífero Rio Claro, na zona saturada.

Braga (2008) também em Rio Claro (SP) utilizou dos métodos geofísicos elétricos, especialmente a eletroresistividade, em um estudo de vulnerabilidade natural de aquíferos. Levantamentos efetuados pelo método da eletroresistividade permitiram extrair um grande número de informações, as quais podem subsidiar estudos, tanto envolvendo a captação de águas subterrâneas, como no monitoramento e preservação dos aquíferos frente a contaminantes diversos.

Bortolin & Malagutti Filho (2012) realizaram um estudo próximo à cidade de Rio Claro (SP) onde aplicaram o método da Eletroresistividade utilizando as técnicas da Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e o Imageamento Elétrico. O trabalho tinha como principal objetivo o monitoramento temporal de uma pluma de contaminação oriunda do aterro controlado de Rio Claro entre os anos de 1999 e 2008. Os métodos geoeletricos mostraram-se plenamente satisfatórios para a realização da pesquisa.

Os métodos geofísicos também são ferramentas importantes quando utilizados em estudos ambientais.

Estudos realizados por Elis & Zuquette (2002) avaliam o uso do Caminhamento Elétrico junto com a Sondagem Elétrica Vertical na contaminação de resíduos sólidos urbanos em um aquífero em Ribeirão Preto (SP). A utilização de ambas as técnicas mostrou

o grande potencial de aplicação dos métodos elétricos no estudo da contaminação gerada por áreas de disposição de resíduos. Os resultados obtidos pelos ensaios geofísicos permitiram uma avaliação das áreas de disposição de resíduos quanto às características do meio físico (nível d'água, fluxo subterrâneo, espessura dos materiais inconsolidados, presença de fraturas) e quanto às relações entre os resíduos e o local de disposição (detecção e delimitação da zona de influência e avaliação da intensidade de contaminação).

Já Silva et al. (2011), em um estudo realizado em Ji-Paraná (RO), utilizou as técnicas da Sondagem Elétrica Vertical e do Caminhamento Elétrico para delimitar a pluma de contaminação de nitrato em um aquífero no bairro de Nova Brasília. O caminhamento elétrico permitiu um modelo 2D, onde as anomalias de baixa resistividade caracterizam as zonas com presença de contaminantes. A pluma de contaminantes indicada pelos ensaios geoeletricos e detectada em análises químicas mostrou que mesmo nas zonas de maior profundidade do aquífero, havia alta concentração de nitrato correspondente às anomalias de baixa resistividade. Em síntese, os métodos aplicados neste estudo mostraram a importância de se identificar contaminações oriundas de despejos domésticos localizadas em áreas urbanas, no caso o nitrato, sendo o maior poluente.

Obrike et al. (2011) em um aquífero raso próximo a Keffi Town na porção centro-norte da Nigéria, onde apresentava contaminação por nitrato, a técnica da Sondagem Elétrica Vertical foi utilizada para avaliar a profundidade do aquífero, e também a concentração de nitrato na água subterrânea. Com a mudança dos valores de resistividade registrados pela sondagem, foi possível identificar diferentes estratos ao longo da seção vertical (solo, rocha alterada, rocha fraturada, rocha fresca). A rocha alterada é onde se encontrava o nível freático, e a concentração do nitrato apresentou valores abaixo do máximo permitido (10mg/L) pelo World Health Organization (2007). As concentrações maiores estavam próximas à ocupação humanas onde não havia uma gestão dos resíduos resultando em lixiviação para as águas subterrâneas.

Já Saraiva (2010) utilizou os métodos geofísicos elétricos descritos anteriormente combinados com Ground Penetrating Radar (GPR) e Eletromagnetismo (EM) para estudar o comportamento espacial de plumas de necrochorume no Município de Pirassununga (Estado de São Paulo), no campus da Universidade de São Paulo na área rural da cidade. Diante dos resultados obtidos neste estudo, a eletrorresistividade (principalmente o caminhamento elétrico) mostrou ser o método mais eficaz se comparado aos demais que não se mostraram adequados às condições do estudo realizado.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do Trabalho de Formatura, foram efetuados inicialmente levantamentos bibliográficos sobre os métodos geofísicos elétricos e sua aplicabilidade nos estudos hidrogeológicos, a geologia regional e local e também a possibilidade de comparar os resultados obtidos pelos métodos indiretos de investigação (geofísicos) com os diretos (poços de monitoramento existentes na área).

5.1 Caminhamento Elétrico (CE)

Para a aquisição dos dados referentes ao Caminhamento Elétrico foi utilizado o equipamento Resistivímetro Multieletrodo marca IRIS, modelo Syscal Swith Pro®, com 48 canais, do parque de equipamentos do Instituto de Geociências USP (Foto 1).



Foto 1 – Resistivímetro Multieletrodo marca IRIS modelo Syscal Swith Pro®.

Este equipamento possui um programa de entrada de dados, denominado Electre II®, que permite montar vários arranjos de campo com os 48 canais, inclusive com a escolha do local do equipamento no início, meio ou fim da linha.

A programação com os arranjos escolhidos foi montada em notebook e enviada ao equipamento através de conexão via cabo. Em todas as etapas de campo o resistivímetro foi locado no meio da configuração dos cabos para melhor contato visual com todos os eletrodos dos perfis levantados.

Foram realizadas 12 linhas de Caminhamento Elétrico na área estudada, sendo 6 delas realizadas em campanha preliminar (julho/2013 - antes da remoção do eucalipto da área) e 6 realizadas em campanha final (setembro/2013 - após a remoção do eucalipto da

área). O objetivo deste método visa fornecer um diagnóstico de estruturas verticais presentes (Figura 11).

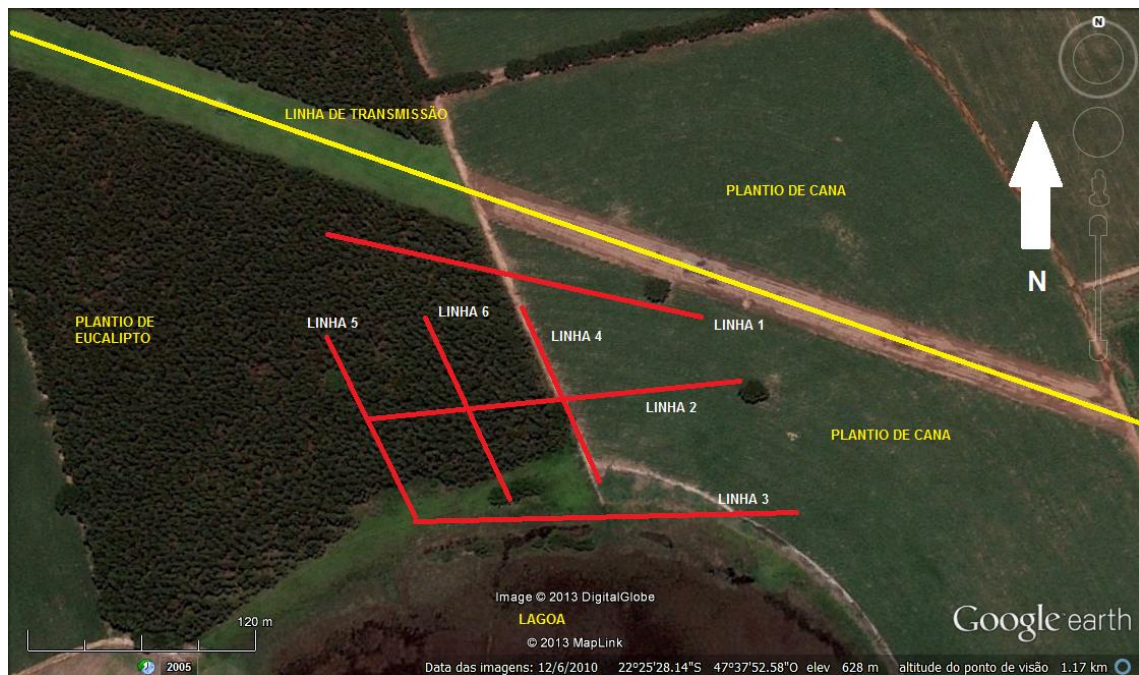


Figura 11 – Disposição das linhas de Caminhamento Elétrico realizadas nas campanhas de aquisição geofísica sobre imagem Google Earth®.

Os levantamentos foram realizados com dipolos de 5,0 m para as linhas 1, 2 e 3 e de 2,5 m para as linhas 4, 5 e 6 (Foto 2).



Foto 2 – Arranjo dos eletrodos em campo (perfil referente à Linha 10 com dipolo de 2,50 m, realizado em setembro de 2013).

A escolha dos dipolos foi baseada no tamanho da área estudada e na malha de poços de monitoramento (Figura 12).

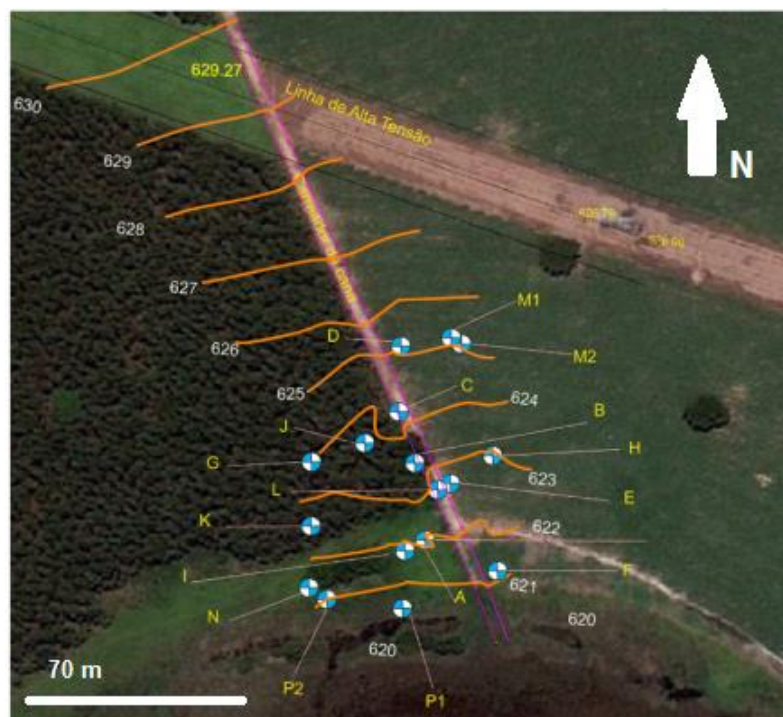


Figura 12 – Curvas de nível e poços instalados em campanhas anteriores sobre Imagem Google Earth®.

A tabela 1 contém as características dos poços de monitoramento existentes na área de estudo.

Tabela 1 – Dados construtivos dos poços de monitoramento.

Poço	Cota Topográfica da boca do poço (m)	Altura do poço (m)	Cota Topográfica do poço (m)	Profundidade do poço (m)	Cota Topográfica do fundo do poço (m)
A	621.96	0.39	621.57	4.59	616.98
B	623.03	0.69	622.34	7.09	615.25
C	624.22	0.48	623.74	7.11	616.63
D	625.26	0.18	625.08	7.67	617.41
E	622.50	0.60	621.90	6.34	615.56
F	621.36	0.38	620.98	4.10	616.88
G	623.73	0.00	623.73	6.90	616.83
H	622.77	0.83	621.94	6.00	615.94
I	621.73	0.00	621.73	2.10	619.63
J	623.62	0.34	623.28	5.85	617.43
K	622.43	0.51	621.92	4.94	616.98
L	622.69	0.05	622.64	4.95	617.69
M1	624.99	0.23	624.76	17.32	607.44
M2	625.06	1.09	623.97	7.97	616.00
N	621.10	0.14	620.96	1.74	619.22
O	623.73	0.22	623.51	18.60	604.91
1	619.55	0.12	619.43	0.83	618.6
2	620.41	1.37	619.04	1.93	617.11
3	621.02	1.02	620.00	1.99	618.01

Após o levantamento, os dados foram transferidos do equipamento para o notebook através de outro software da própria empresa IRIS, Prosys II, sendo cada linha exportada em formato DAT para uso no código de inversão RES2DINV da Geotomo Software.

No software RES2DINV foram realizadas as inversões dos dados e o arquivo salvo em formato INV. Após o tratamento dos dados com os filtros selecionados para melhor preparo da imagem, os perfis de resistividade foram gerados já acompanhando a topografia do local.

5.2 Sondagem Elétrica Vertical (SEV)

Para a aquisição dos dados da Sondagem Elétrica Vertical foi utilizado o equipamento Resistímetro Terrameter ABEM Modelo SAS 300B (Foto 3) e Booster Modelo SAS 2000 necessário para grandes aberturas entre eletrodos ($AB/2$).



Foto 3 – Equipamento Resistímetro Terrameter ABEM Modelo SAS 300B.

Foram realizadas 10 SEV ao longo de algumas linhas de caminhamento elétrico visando abranger toda área estudada (Figura 13 e Foto 4).

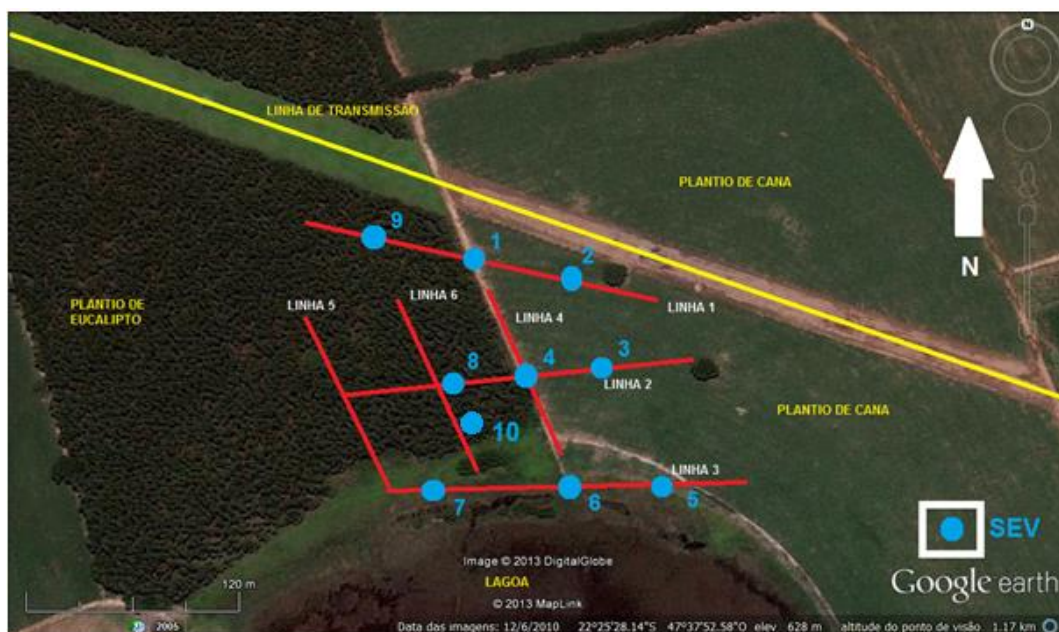


Figura 13 – Disposição das SEV ao longo de toda área de estudo realizada após a primeira campanha de caminhada elétrica sobre imagem Google Earth®.

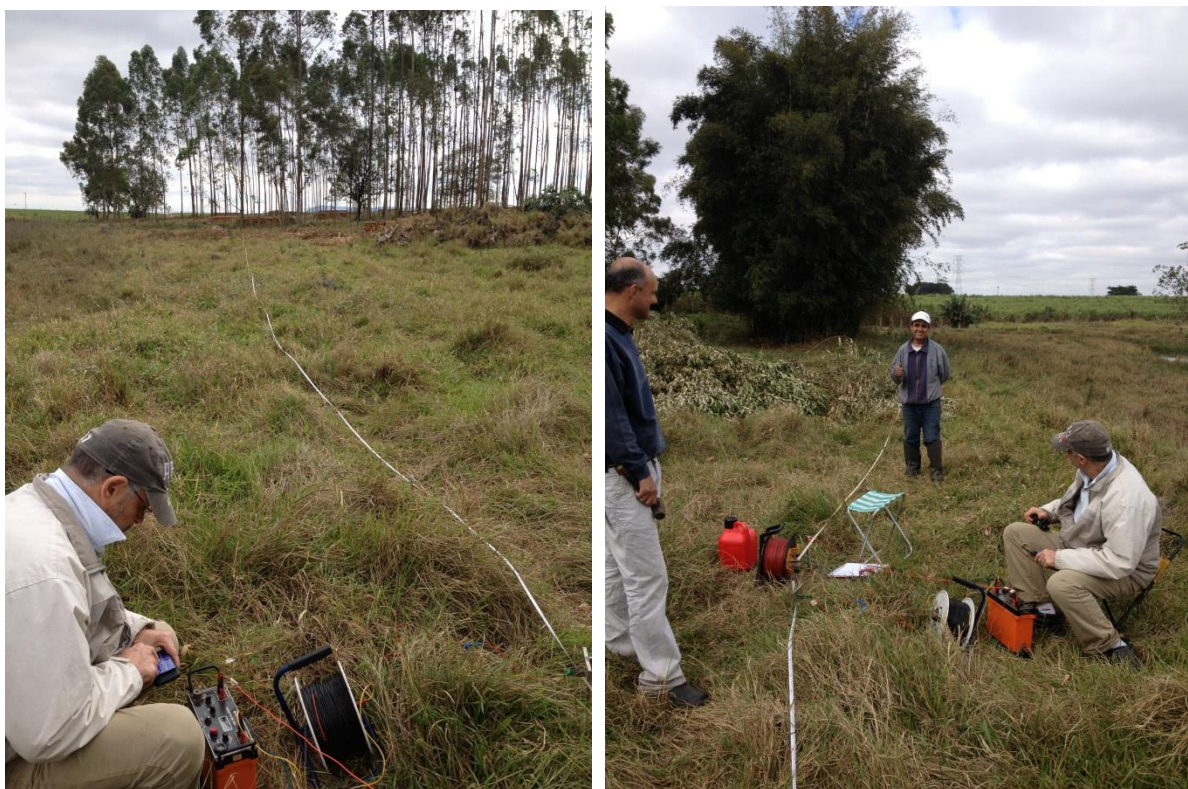


Foto 4 – Arranjo Schumblerger em campo.

A SEV 10 foi realizada no mesmo local onde se encontrava o poço de monitoramento “O”.

5.3 Potencial Espontâneo (SP)

Para a aquisição dos dados de Potencial Espontâneo foi utilizada a Técnica dos Potenciais ou Base Fixa, com um eletrodo mantido fixo em uma estação-base, enquanto outro percorria pontos de medida a cada 10,0 m ao longo das linhas 1, 2 e 3 do caminhamento elétrico e entre as mesmas.

Para se corrigir os ruídos presentes no levantamento, especialmente a variações do SP com o tempo, foram realizadas medidas de SP entre os eletrodos colocados lado a lado no início e ao final dos trabalhos. Também foi mantido constante o nível da solução nos dois eletrodos ao longo do levantamento, sendo os eletrodos mantidos limpos de solo após cada medida.

As medidas foram realizadas em covas previamente umedecidas, para melhorar o contato dos eletrodos com o solo.

Foram utilizados eletrodos fabricados pelo co-orientador junto ao CEPAS-USP, com uso de tubo PVC marrom e tendo como elemento poroso parte de piso cerâmico colado internamente e com a porção vitrificada lixada, permitindo bom contato da solução com o solo (Foto 5).



Foto 5 – Eletrodo “Base-fixa” em campo.

5.4 Execução de Sondagens

Foram realizadas 4 sondagens com trado manual (ST-1, ST-2, ST-3 e ST-4) ao longo da linha 1 de caminhamento elétrico, sendo as duas primeiras realizadas na área de plantio de eucalipto e as demais realizadas na área de plantio de cana-de-açúcar (Foto 6).



Foto 6 – Execução da Sondagem ST-2 dentro da área correspondente ao plantio de eucalipto.

A tabela 2 apresenta as características das sondagens que foram executadas ao longo da linha 1 do caminhamento elétrico.

Tabela 2 – Característica das sondagens executadas ao longo da linha 1 do caminhamento elétrico.

Sondagem	ST-1	ST-2	ST-3	ST-4
Distância em relação à estrada de terra (m)	75,0	35,0	35,0	75,0
Profundidade Total (m)	8,0	9,0	5,00	5,0

 Zona de plantio de eucalipto

 Zona de plantio de cana

O objetivo da execução das sondagens foi de obter uma comparação dos dados geofísicos com a descrição geológica da área, em especial os estratos horizontais mais resistivos detectados nos perfis levantados.

5.5 Balanço Hídrico

O balanço hídrico pode ser considerado como o equacionamento das entradas e saídas de água dentro de uma unidade hidrográfica durante um determinado intervalo de tempo. As entradas compreendem a precipitação, águas superficiais e subterrâneas que chegam à região, enquanto que as saídas incluem a evapotranspiração e o escoamento superficial e subterrâneo que deixam a área.

A metodologia, para as estimativas de balanço hídrico, desenvolvida por Thornthwaite e Mather (1955), que é uma das várias maneiras de se avaliar a variação do armazenamento de água no solo em uma bacia hidrográfica, envolvendo apenas dois elementos meteorológicos: temperatura média mensal e a precipitação média mensal. Além disso, também relaciona as entradas e saídas de água, ocorridas num determinado espaço e durante um ano, considerando a variação do volume de água a partir da aplicação do princípio da conservação de massa.

Por meio da contabilização do suprimento natural da água no solo, da precipitação (PRE), da demanda atmosférica e capacidade de água disponível (CAD), essa metodologia fornece estimativas da evapotranspiração potencial (ETP) e real (ETR), do déficit hídrico (DEF), do excedente hídrico (EXC) e do armazenamento de água no solo (ARM) (Sentelhas et. al, 2003).

Diante disso, o balanço hídrico simplificado pôde ser estabelecido a partir da identificação do volume de água recebido, armazenado e perdido pela bacia, por meio da seguinte equação:

$$PRE = ESC + \Delta ARM + ETR$$

Onde, PRE: precipitação (mm); ESC: escoamento superficial (mm); ETR: evapotranspiração real (mm); e ΔARM : variação no armazenamento de água na zona não saturada (mm).

Para o desenvolvimento das estimativas do balanço hídrico, alguns procedimentos e parâmetros foram adotados e calculados:

- *Evapotranspiração potencial (ETP) e real (ETR)*: refere-se à perda de água ocorrida tanto pela superfície do solo (evaporação), quanto pelas plantas (transpiração). A evapotranspiração real não depende somente dos fatores meteorológicos, mas também das propriedades físicas do solo e dos aspectos relacionados à cobertura vegetal (MOTA, 1986). O solo úmido representa a manutenção da evapotranspiração na razão potencial, sendo determinada pelas condições climáticas predominantes. Com o decréscimo da umidade, o solo começará a secar e a evapotranspiração real será menor que a potencial (déficit).

- *Precipitação (PRE) e Temperatura (T)*: valores médios baseados em dados de Normais Climatológicas, no caso deste estudo, de janeiro a setembro de 2013 da estação climatológica situada no Centro de Análise e Planejamento Ambiental (CEAPLA) nas dependências da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), em Rio Claro. A latitude é 22°23'S e a longitude 47°32'W, enquanto que a altitude é de 626,5 metros.

- *Armazenamento de água (ARM) ou Capacidade de Campo (CAD)*: é a quantidade de água contida no solo após ter sido drenado o excesso de água gravitacional e após ter diminuído muito a velocidade do movimento descendente da água. É a capacidade máxima que um solo tem de reter água em seus capilares contra a ação da gravidade. Para a área de estudo, o valor de CAD adotado foi de 300 mm, devido às características do solo e do predomínio de uma vegetação com raízes profundas.

- *Déficit Hídrico (DEF)*: definição dos períodos e das magnitudes da deficiência hídrica no solo, representada pelo tempo em que a evapotranspiração potencial é maior do que a evapotranspiração real.

- *Excedente Hídrico (EXC)*: é a água perdida por escoamento superficial ou subterrâneo/percolação profunda (recarga dos aquíferos).

6. RESULTADOS OBTIDOS

6.1 Caminhamento Elétrico (CE)

Após o levantamento os dados foram transferidos do equipamento para o notebook através de outro software da própria empresa IRIS, Prosys II, sendo cada linha exportada em formato DAT para uso no código de inversão RES2DINV da Geotomo Software.

No software RES2DINV foram realizadas as inversões dos dados e o arquivo salvo em formato INV. Após o tratamento dos dados com os filtros selecionados para melhor preparo da imagem, os perfis de resistividade foram gerados já acompanhando a topografia do local.

No próprio software foram utilizadas ferramentas visando refinar os perfis gerados:

- *Limit range of model resistivity values*: utilizada para limitar os valores mais altos e mais baixos de resistividade adquiridos para realizar o processo de inversão.

- *Vertical/Horizontal flatness filter ratio*: utilizada para refinar os parâmetros de inversão dos dados. Normalmente inicia-se com 1.0. Quando necessário aperfeiçoar seções de resistividade alongadas na vertical, aumenta-se o valor (por exemplo, 2.0). Quando necessário aperfeiçoar seções de resistividade alongadas na horizontal, diminui o valor (por exemplo, 0.5).

- *Reduce variations near borehole*: em alguns casos, os valores obtidos próximos a buracos em subsuperfície podem apresentar grandes variações na resistividade. Esta ferramenta pode ser utilizada para reduzir essas variações.

- *Mesh refinement (finest mesh)*: melhora a precisão no cálculo dos valores de resistividade aparente.

- *Use model refinement (Use model cells with widths of half the unit spacing)*: divide o dipolo utilizado na metade visando melhorar interpretações em subsuperfície.

A primeira campanha foi realizada antes do corte do eucalipto (porção oeste da área estudada). Foram realizadas 6 linhas e gerados 6 perfis de resistividade. A segunda campanha foi realizada após o corte do eucalipto e tem como objetivo estabelecer uma comparação entre ambas (Figuras 14 a 19).

Após a elaboração dos perfis no software RES2DINV, os arquivos foram salvos no formato do software SURFER versão 9 e foram geradas novas figuras utilizando-se uma mesma escala de resistividade para melhor comparação dos dados como pode ser observado no capítulo 7.

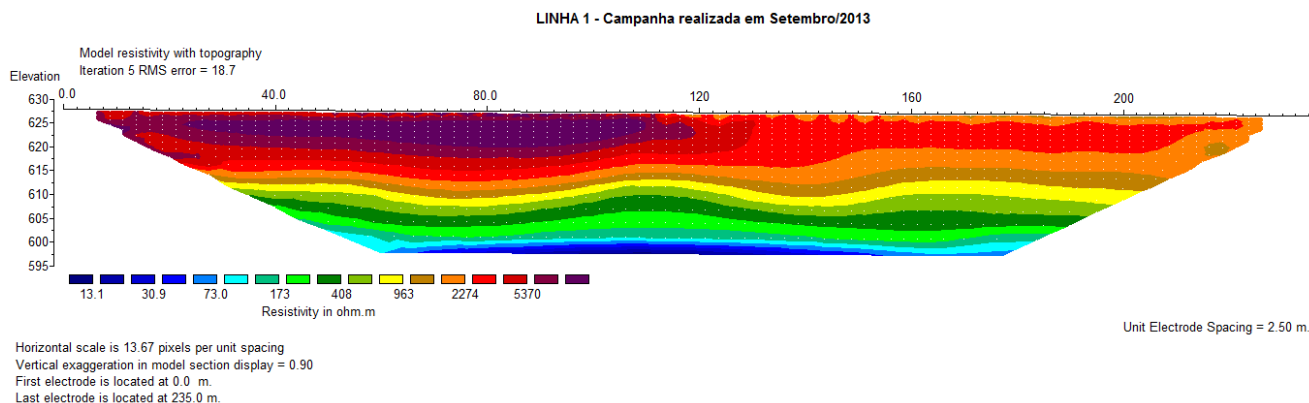
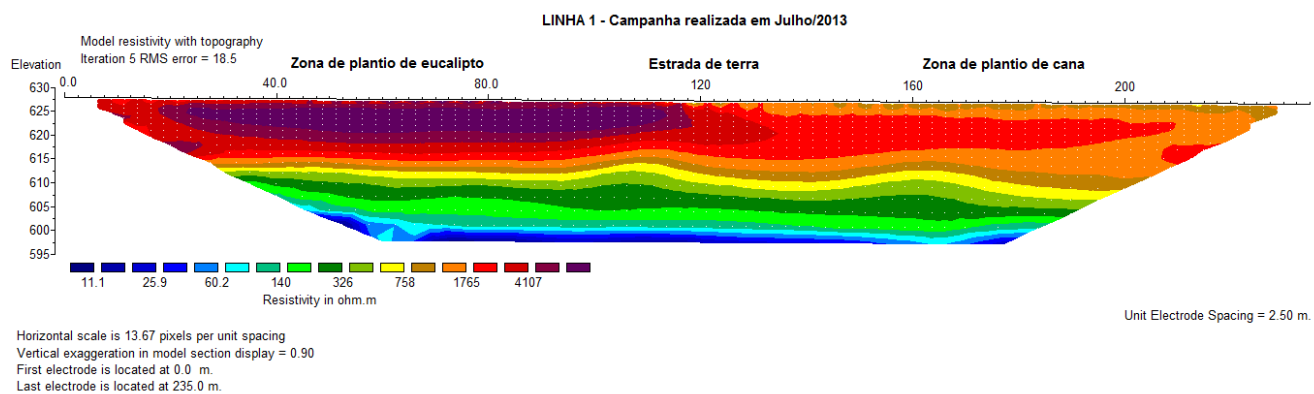


Figura 14 – Perfis de resistividade referentes à Linha 1 das campanhas de julho/2013 e setembro/2013. Software RES2DINV.

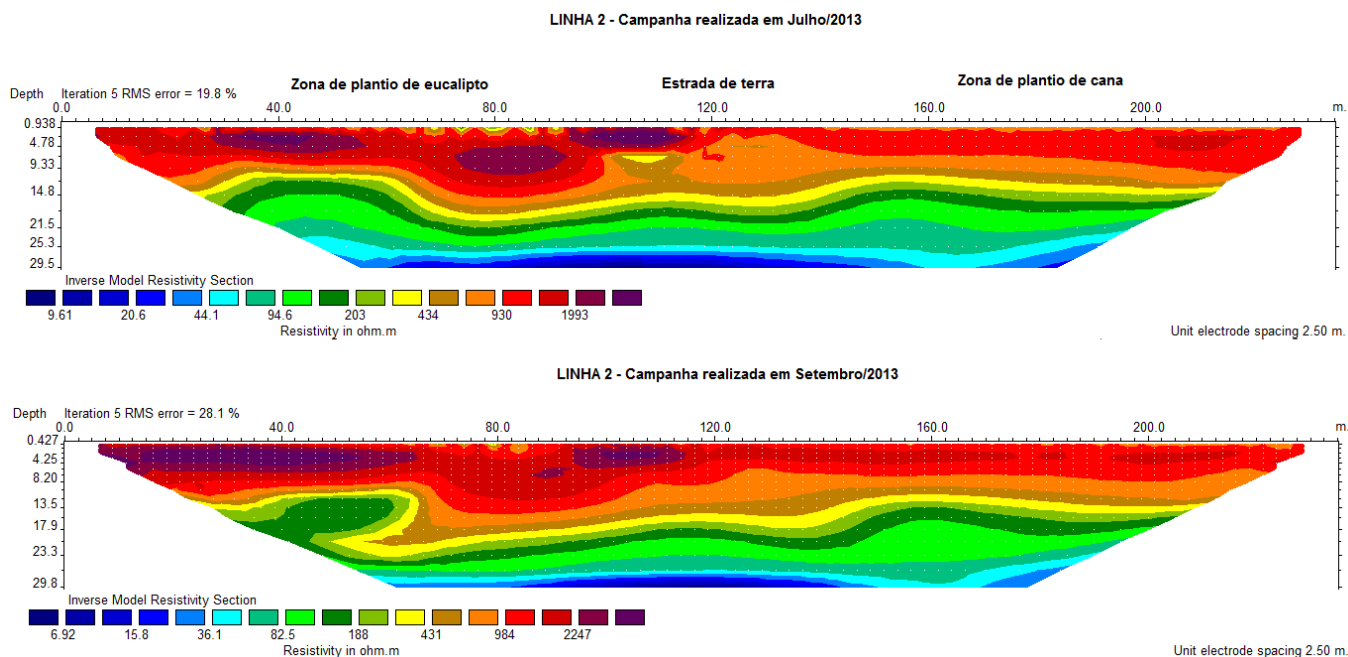


Figura 15 – Perfis de resistividade referentes à Linha 2 das campanhas de julho/2013 e setembro/2013. Software RES2DINV.

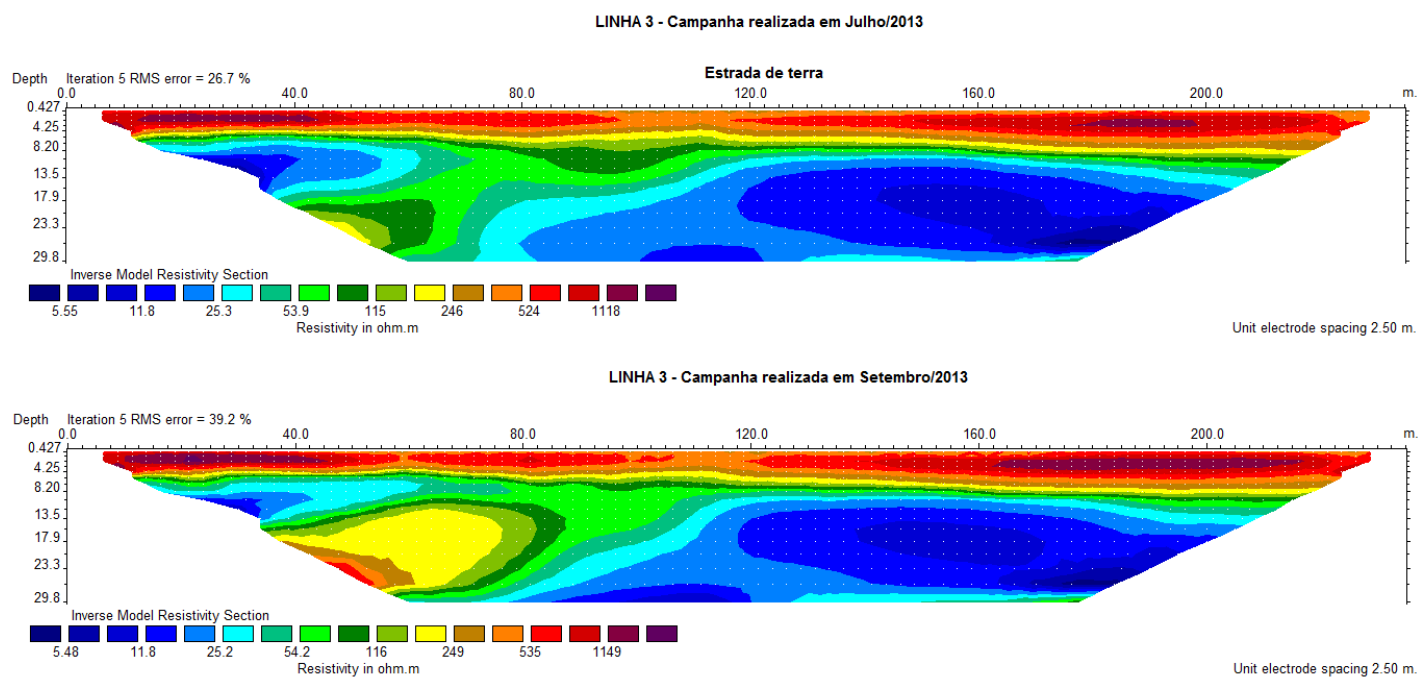


Figura 16 – Perfis de resistividade referentes à Linha 3 das campanhas de julho/2013 e setembro/2013. Software RES2DINV.

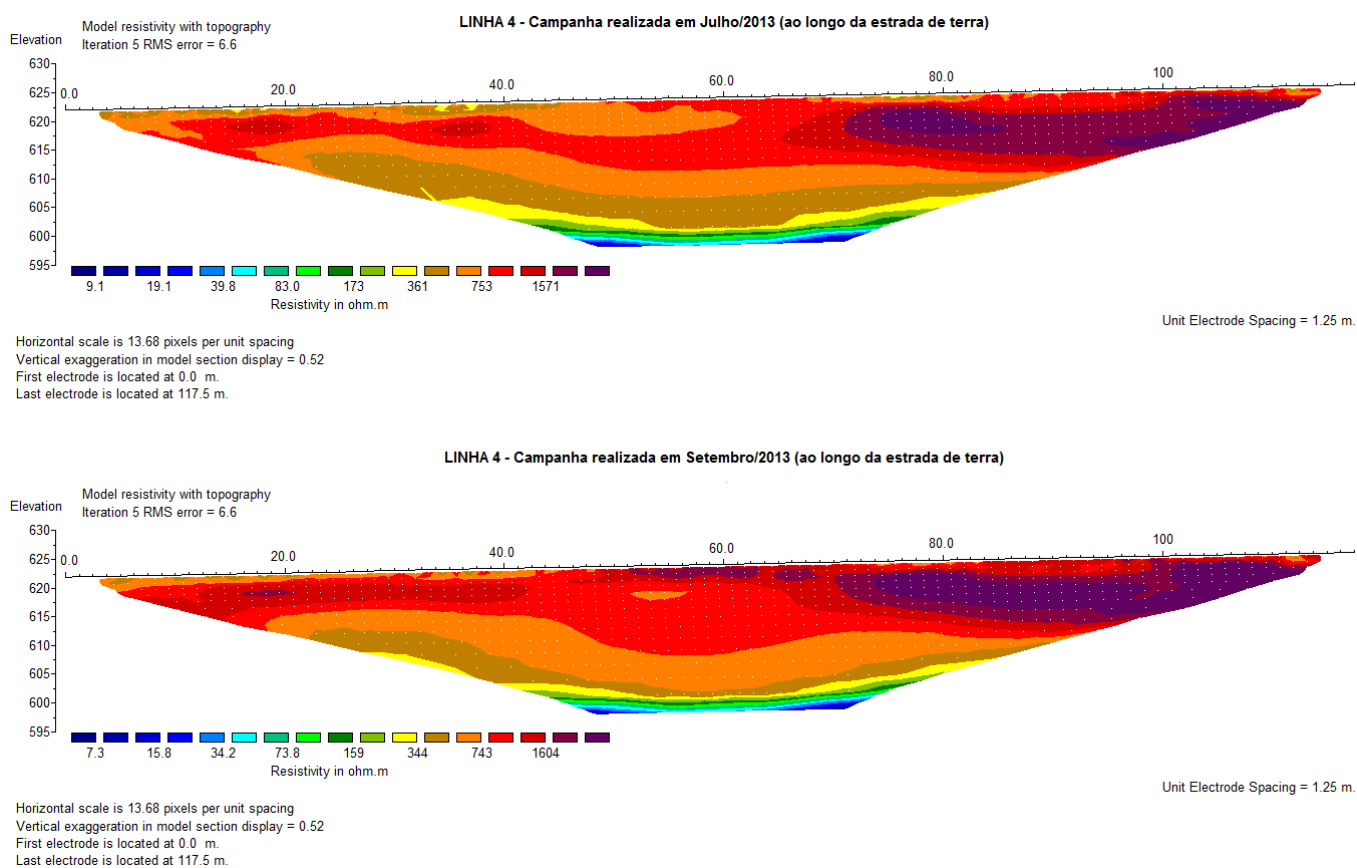


Figura 17 – Perfis de resistividade referentes à Linha 4 das campanhas de julho/2013 e setembro/2013. Software RES2DINV.

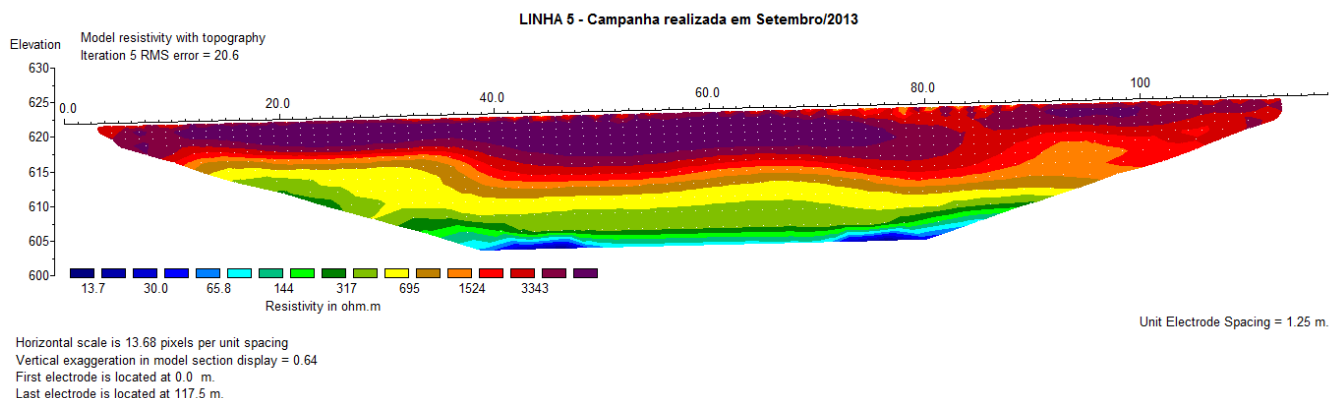
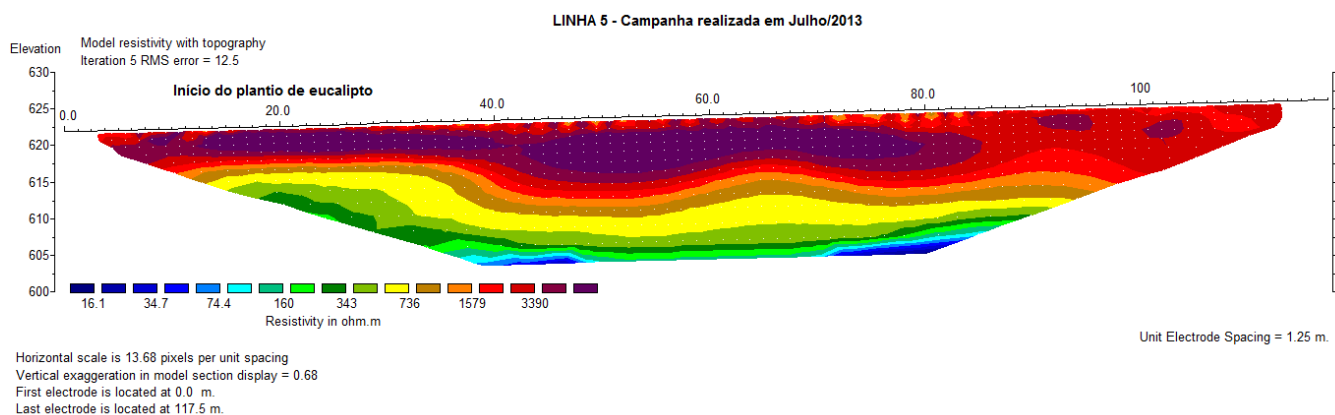


Figura 18 – Perfis de resistividade referentes à Linha 5 das campanhas de julho/2013 e setembro/2013. Software RES2DINV.

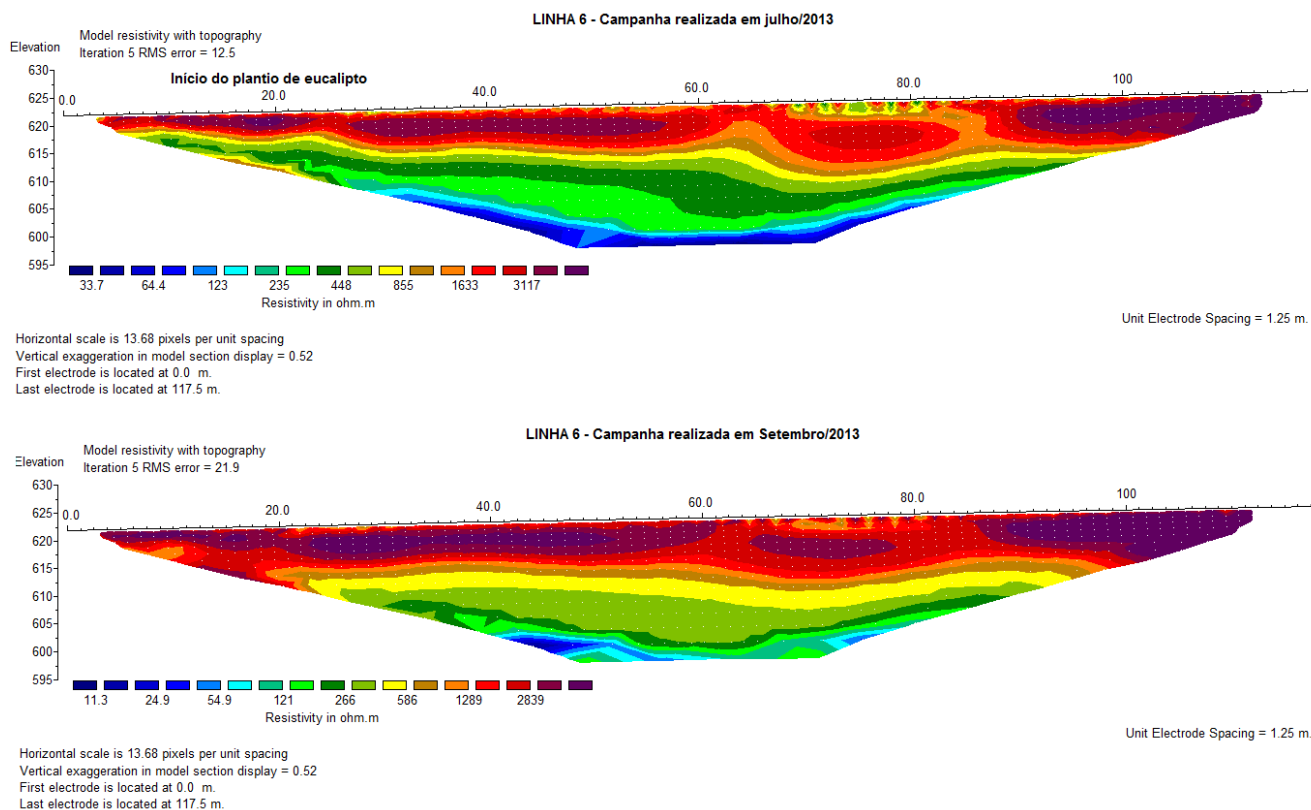


Figura 19 – Perfis de resistividade referentes à Linha 6 das campanhas de julho/2013 e setembro/2013. Software RES2DINV.

6.2 Sondagem Elétrica Vertical (SEV)

Após o levantamento dos dados, foram elaboradas tabelas (Apêndice 1) com todas as SEV realizadas e seus respectivos valores de resistividade detectados.

Os dados foram transportados para o software IPI2WIN + IP da Universidade de Moscou, que tem como finalidade construir curvas com os valores de resistividade obtidos em campo, permitindo interpretar tanto a profundidade do nível d'água como os estratos geoeletricos que refletem as características geológicas do terreno (Figuras 20 a 29).

Nos gráficos estão representados ρ (resistividade), h (espessura do estrato geoeletrico) e d (profundidade do estrato geoeletrico).

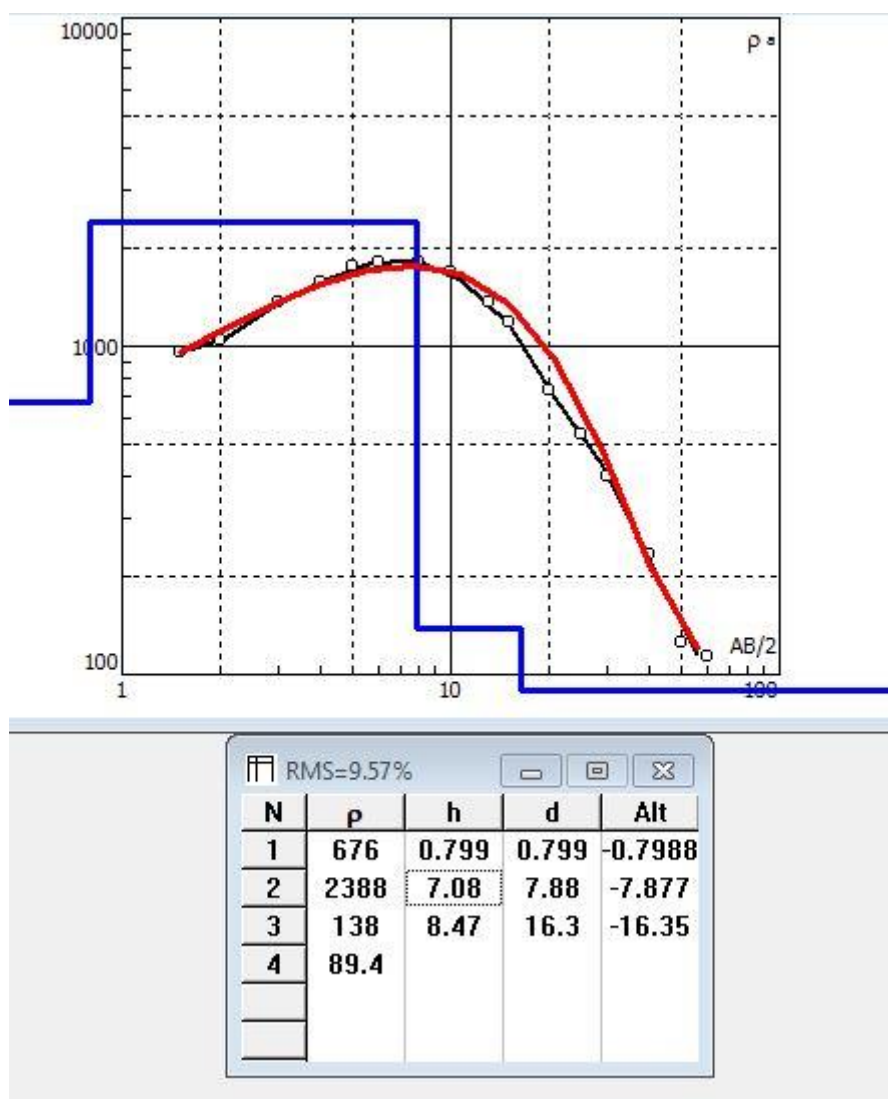


Figura 20 – Curvas da SEV 1 com os respectivos valores encontrados em profundidade.

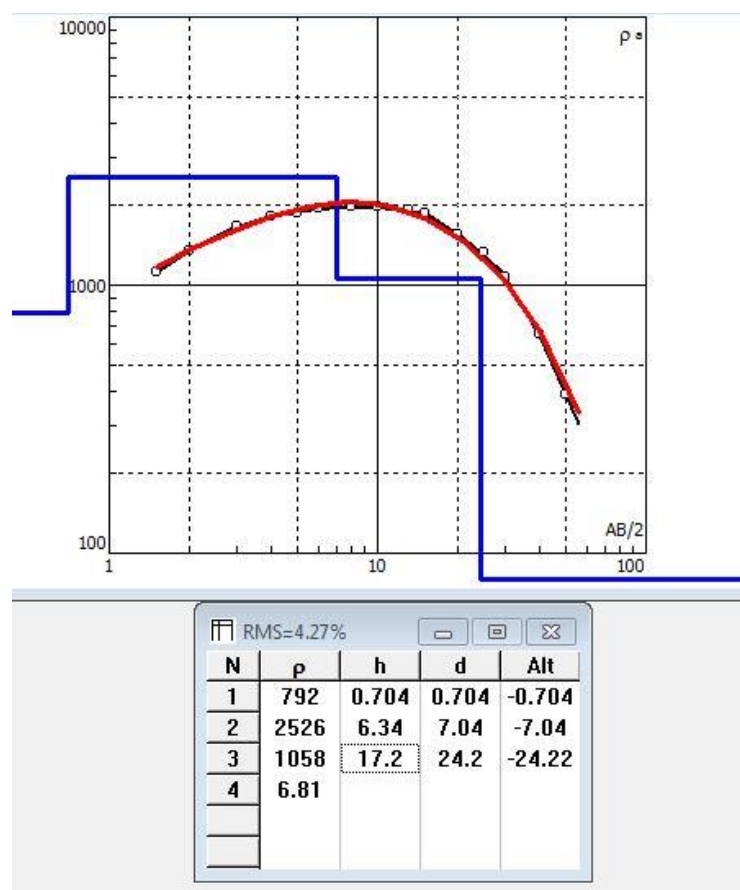


Figura 21 – Curvas da SEV 2 com os respectivos valores encontrados em profundidade.

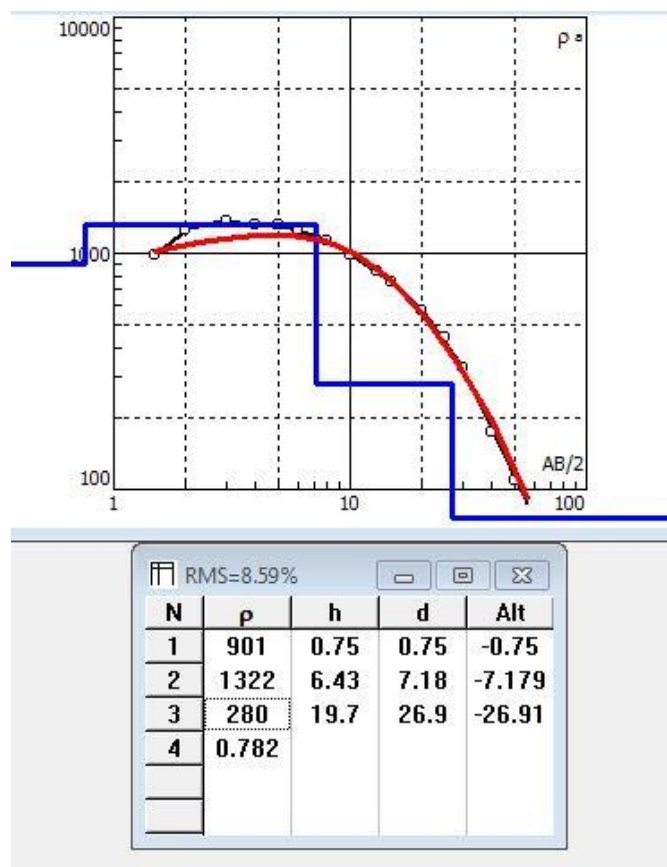


Figura 22 – Curvas da SEV 3 com os respectivos valores encontrados em profundidade.

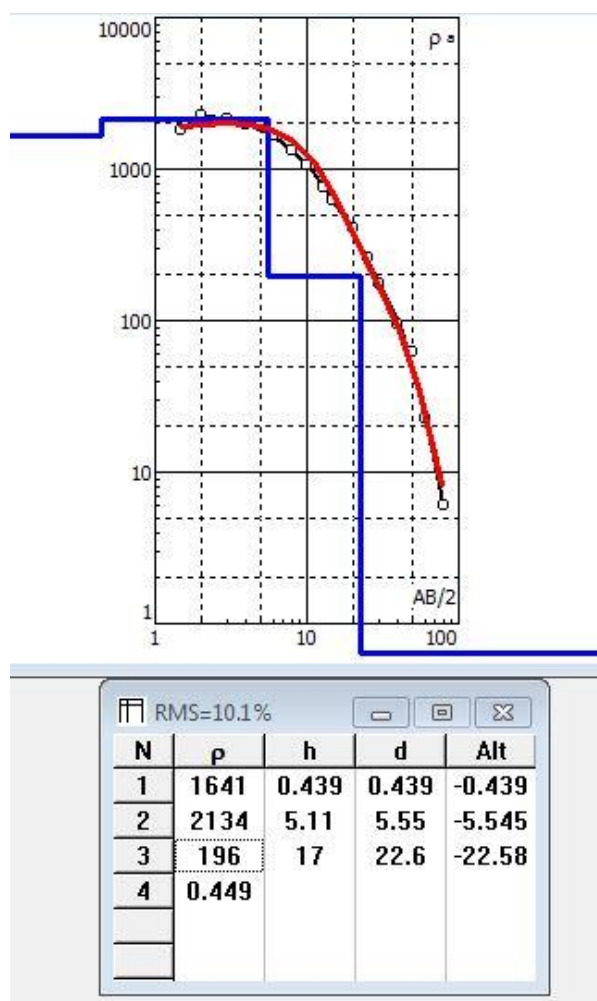


Figura 23 – Curva da SEV 4 com os respectivos valores encontrados em profundidade.

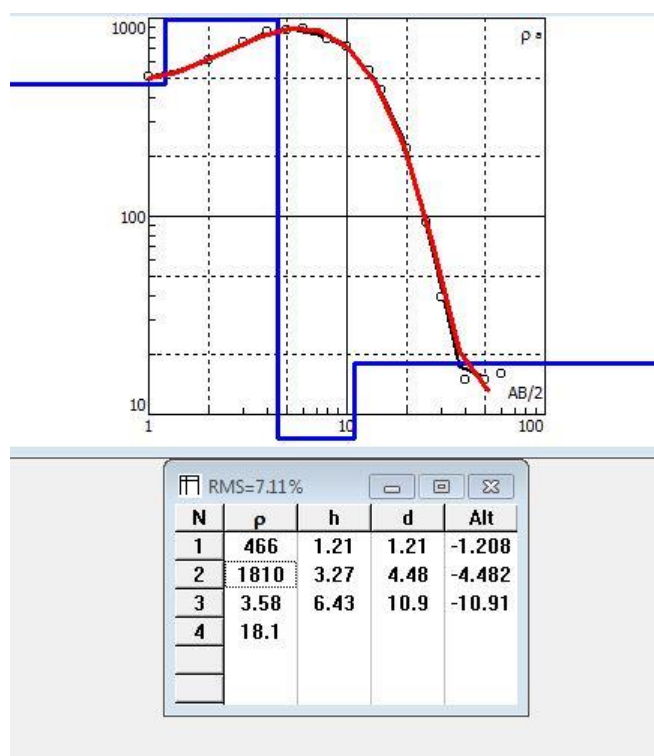


Figura 24 – Curva da SEV 5 com os respectivos valores encontrados em profundidade.

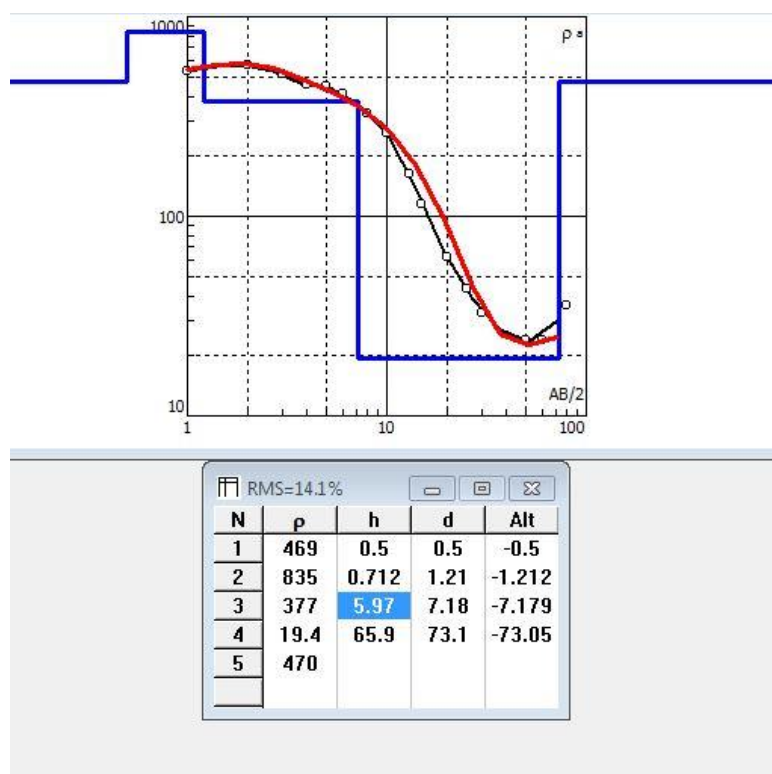


Figura 25 – Curva da SEV 6 com os respectivos valores encontrados em profundidade.

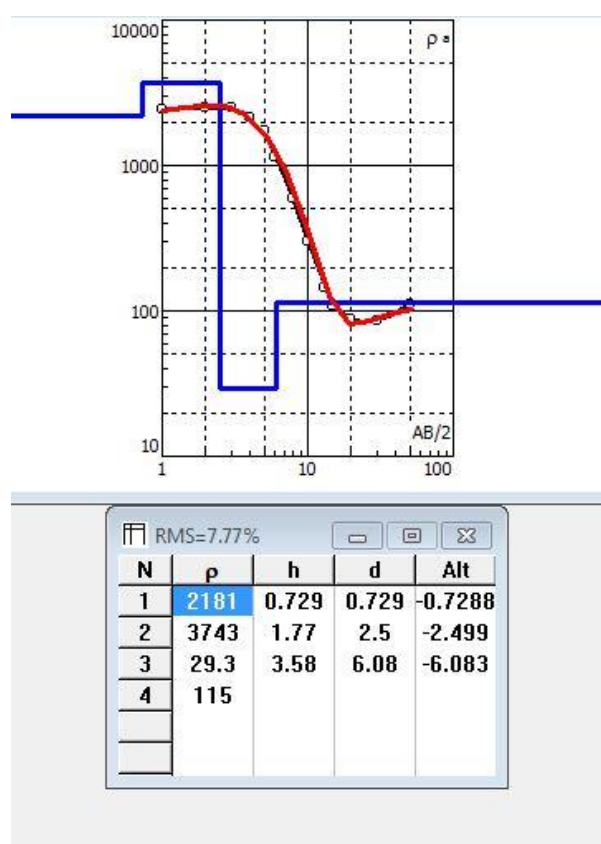


Figura 26 – Curva da SEV 7 com os respectivos valores encontrados em profundidade.

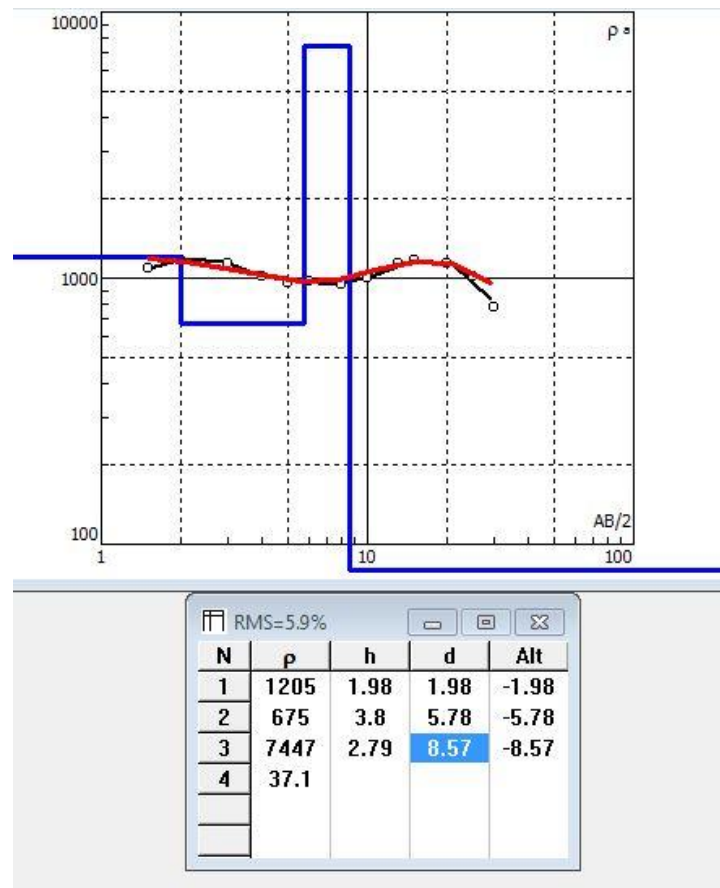


Figura 27 – Curva da SEV 8 com os respectivos valores encontrados em profundidade.



Figura 28 – Curva da SEV 9 com os respectivos valores encontrados em profundidade.

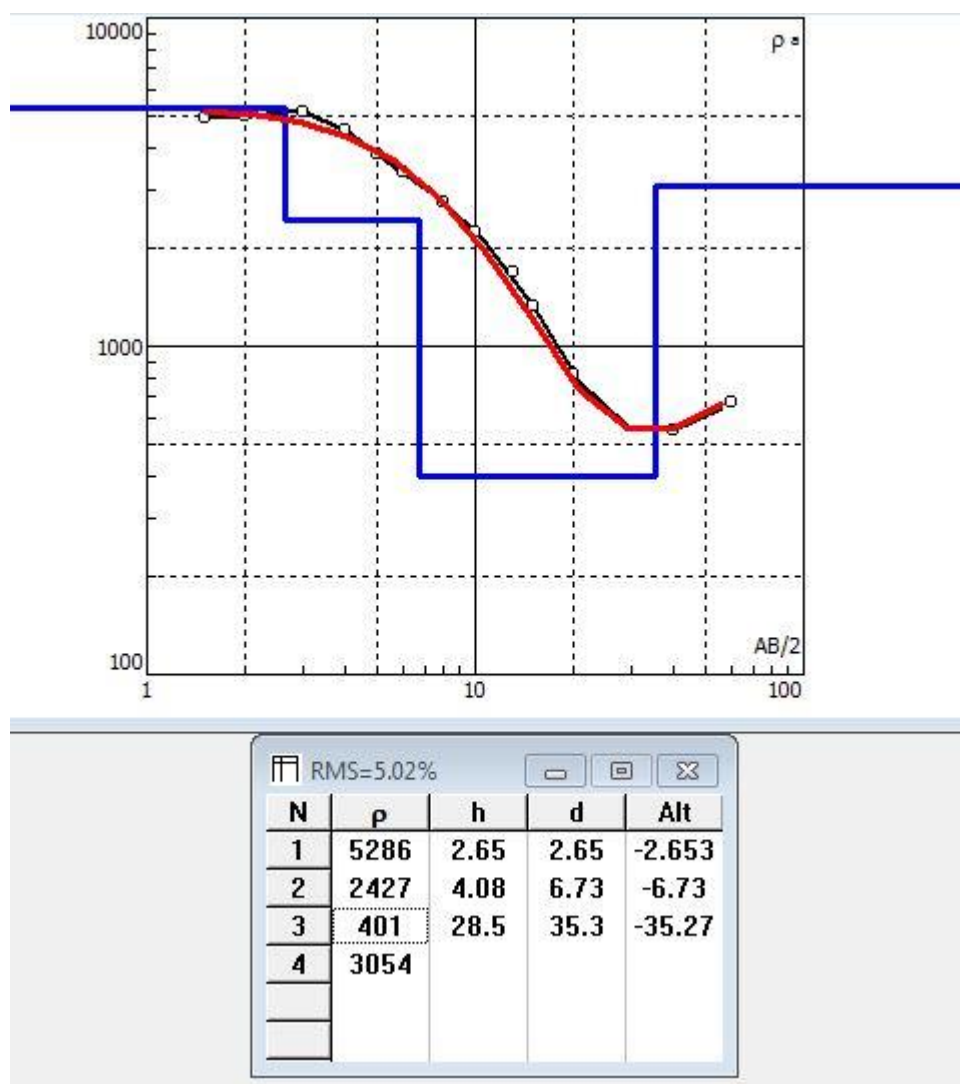


Figura 29 – Curva da SEV 10 com os respectivos valores encontrados em profundidade.

6.3 Potencial Espontâneo (SP)

Após a aquisição dos dados de campo foi criada uma tabela com todos os valores medidos ponto a ponto (Apêndice 2).

No software SURFER versão 9, foi confeccionado um mapa de pontos com as linhas de isovalores em milivolt (mV) (Figura 30).

Já A figura 31 apresenta o mapa de potencial espontâneo com a escala cromática de potencial em mV da área e a direção preferencial de fluxo subterrâneo.

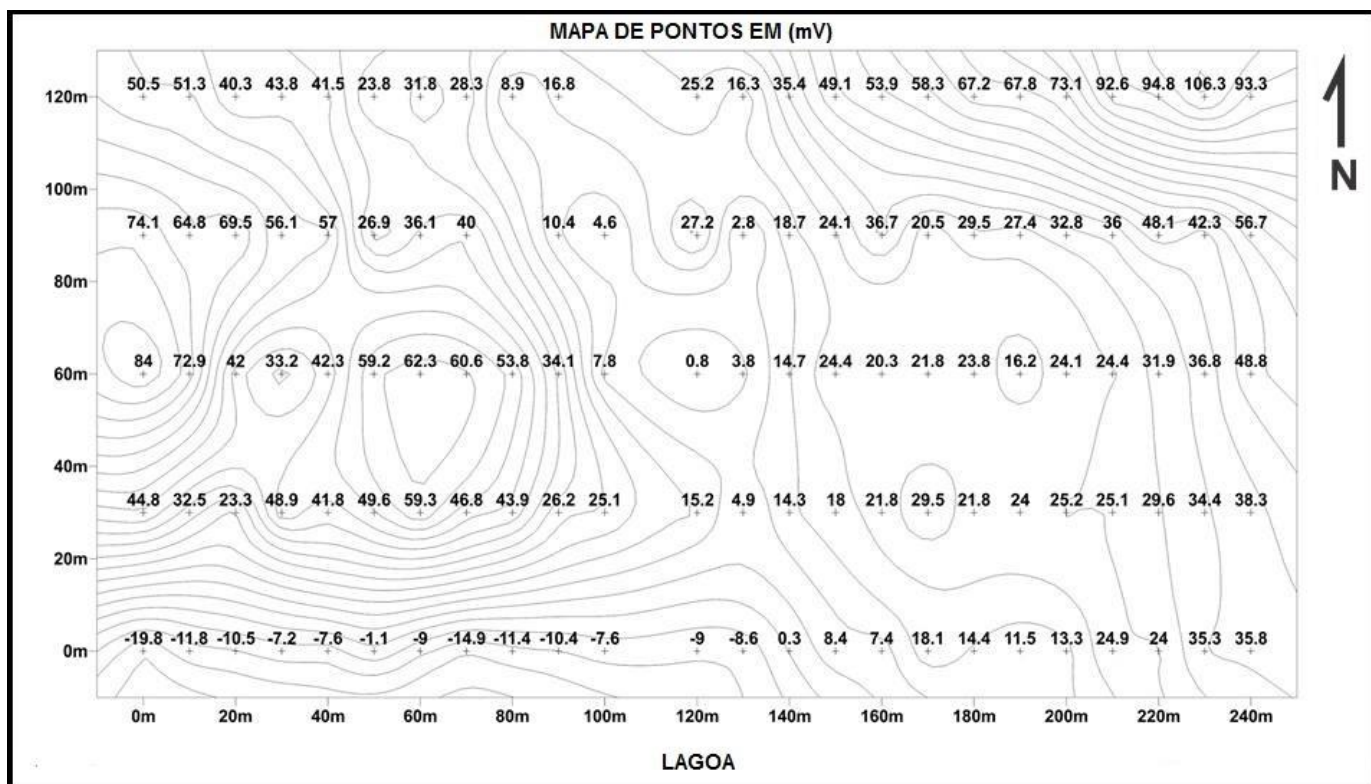


Figura 30 – Mapa de pontos com as curvas de isovalores em milivolts (mV) referente aos dados adquiridos na campanha do Potencial Espontâneo (SP) realizada em outubro/2013. Software SURFER versão 9.

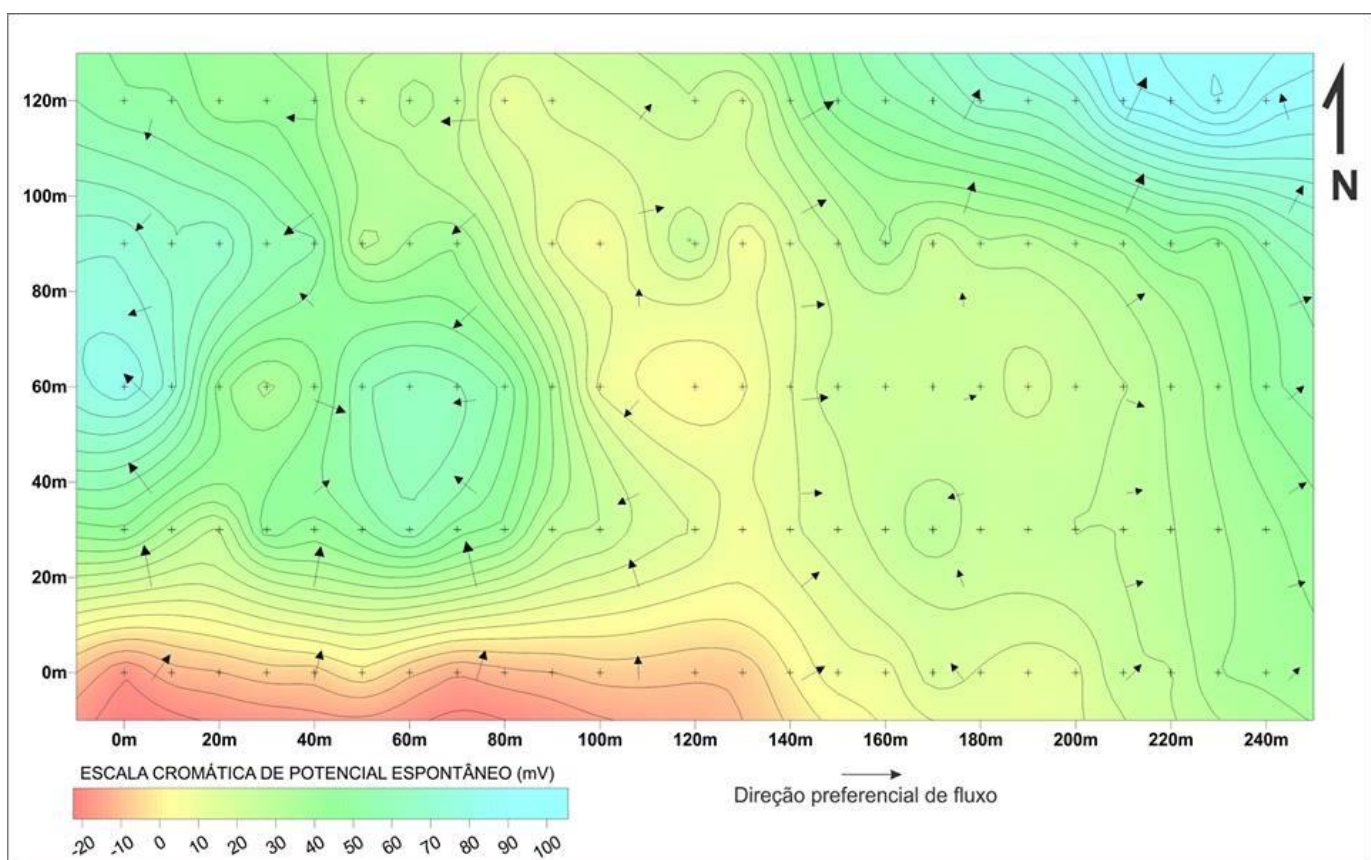


Figura 31 – Mapa de potencial espontâneo com escala cromática de potencial (mV). Software SURFER versão 9.

6.4 Execução de Sondagens

A sondagem ST-1 possui 8,0 m de profundidade e encontra-se ao longo da Linha 1 do caminhamento elétrico à 75,0 m de distância do aceiro entre as plantações de estrada de eucalipto e cana.

Os primeiros 0,5 m de profundidade compreendem a camada de solo de coloração escura. De 0,5 m até 3,0 m de profundidade o material encontrado foi uma areia de granulação fina/média com coloração marrom. De 3,0 m a 4,0 m há apenas mudança na coloração tornando-a marrom clara e a partir de 4,0 m até 8,0 m torna-se ocre e pouco umedecida.

A sondagem ST-2 possui 9,0 m de profundidade e encontra-se ao longo da Linha 1 do caminhamento elétrico à 35,0 m de distância da estrada de terra, também na zona do plantio de eucalipto. Possui as mesmas características da ST-1, porém, a camada após 8,0 m de profundidade a areia começa a adotar uma coloração mais esbranquiçada com presença de pequenos seixos indicando sinais de hidromorfismo.

As demais sondagens (ST-3 e ST-4) foram realizadas ao longo da Linha 1 de caminhamento elétrico à 35,0 m e 75,0 m, respectivamente, de distância da estrada de terra na zona de plantio de cana-de-açúcar. Ambas possuem profundidade de 5,0 m e apresentaram as mesmas características (presença de solo até 0,5 m, areia fina/média marrom escura até cerca de 2,0 m, tornando-se marrom clara, e a partir de 4,0 m de torna-se ocre).

A tabela 3 apresenta um resumo das características geológicas observadas nas sondagens e a figura 32 apresenta o perfil geológico gerado a partir das descrições feitas em campo.

Tabela 3 – Resumo da descrição litológica referente às sondagens executadas na área.

SONDAGEM	ST-1	ST-2	ST-3	ST-4
Distância em relação à estrada de terra (m)	75,0	35,0	35,0	75,0
Profundidade Total (m)	8,0	9,0	5,0	5,0
Solo (m)	0,0 - 0,5	0,0 - 0,5	0,0 - 0,5	0,0 - 0,5
Areia fina/média marrom escura (m)	0,5 - 3	0,5 - 3	0,5 - 2,0	0,5 - 2,0
Areia fina/média marrom claro (m)	3,0 - 4,0	3,0 - 4,0	2,0 - 4,0	2,0 - 4,0
Areia fina/média marrom ocre (m)	4,0 - 8,0	4,0 - 8,0	4,0 - 5,0	4,0 - 5,0
Areia fina/média esbranquiçada (m)	-	8,0 - 9,0	-	-

PERFIL GEOLÓGICO ESQUEMÁTICO REFERENTE À LINHA 1 DO CAMINHAMENTO ELÉTRICO

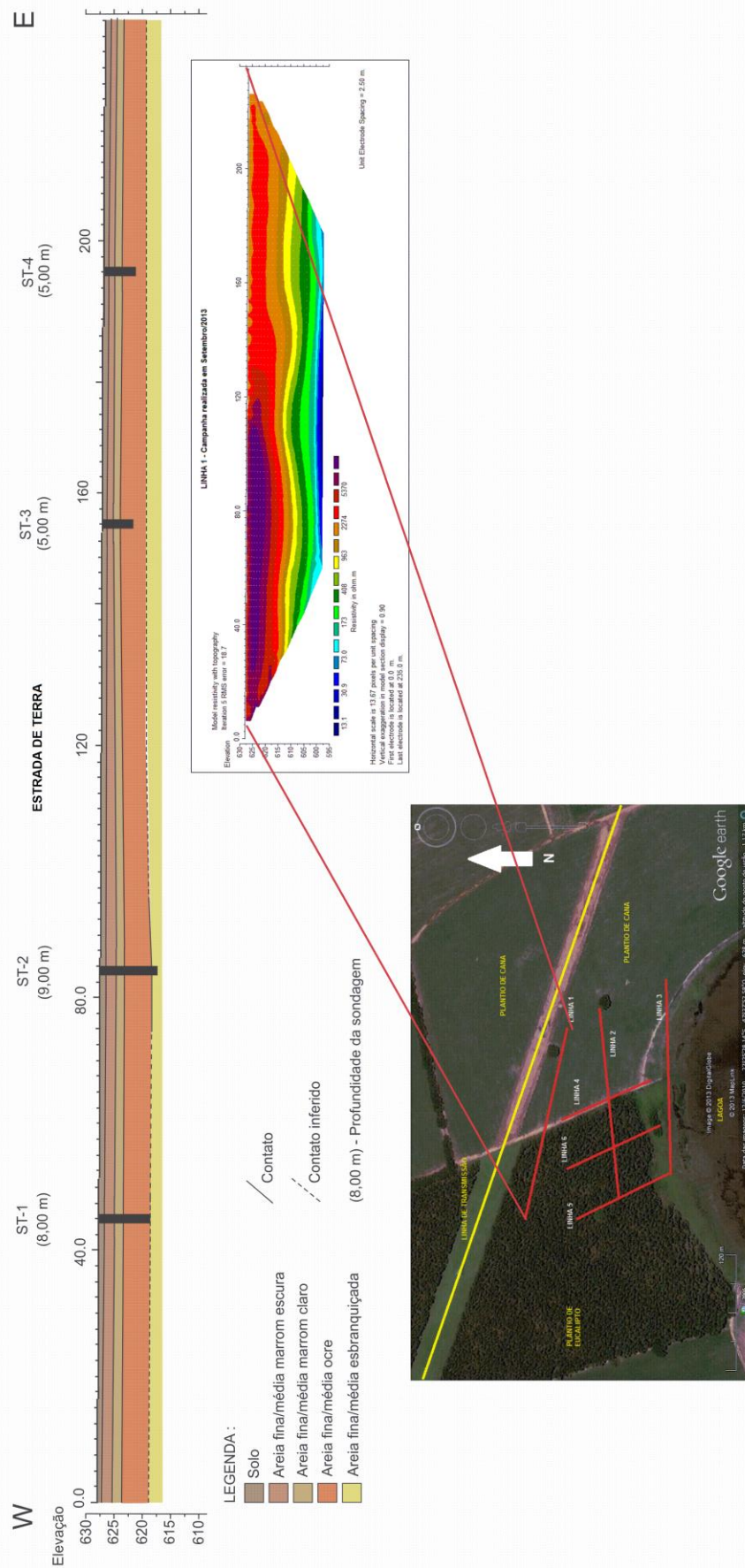


Figura 32 – Perfil geológico esquemático ao longo da linha 1 do caminhamento elétrico.

6.5 Balanço Hídrico e medições do nível d'água

Teoricamente, quando os valores da curva da precipitação (PRE) estão abaixo da curva referente à evapotranspiração potencial (ETP), ocorre o consumo da água que está retida no solo, até que se esgote a capacidade de campo disponível (CAD).

Segue-se, então, o período de deficiência de água no solo, o que se prolonga até que os valores da curva da PRP ultrapassem a curva de ETP, iniciando-se a reposição de água no solo, até completar a CAD. Uma vez completada isso, a sobra é considerada como excedente hídrico (EXC). Os meses em que ocorre esse excedente hídrico correspondem àqueles em que deve ocorrer recarga de água subterrânea, por meio da percolação profunda.

Tendo esse raciocínio, e observando a figura 33, o balanço hídrico estimado para a área de influência da estação de Rio Claro mostrou que, a partir do mês de janeiro, iniciou-se a redução dos índices pluviométricos, mantendo essa tendência até o mês de março, seguido por um pequeno aumento no mês de abril, voltando a reduzir até agosto. Essa tendência não foi observada nas curvas de evapotranspiração real e potencial, mantendo-se quase que constantes até o mês de março, tendo uma queda até junho e, posteriormente, a partir de julho, o início de sua recuperação.

Como o declínio da temperatura no inverno reduz o processo de evapotranspiração e os estoques de água no solo são utilizados lentamente pela vegetação, os maiores déficits hídricos só começaram a ser notados a partir do mês de junho estendendo-se até setembro.

Diante disso, os meses de janeiro a março foi o período que apresentou maior disponibilidade hídrica, ou excedente de água no solo isso pode ser observado também para os meses de abril a julho. A partir de julho os valores medidos de precipitação mensal passam a serem inferiores aos de evapotranspiração potencial e real.

Os dados utilizados para a realização do cálculo do balanço hídrico estão contidos no Apêndice 3.

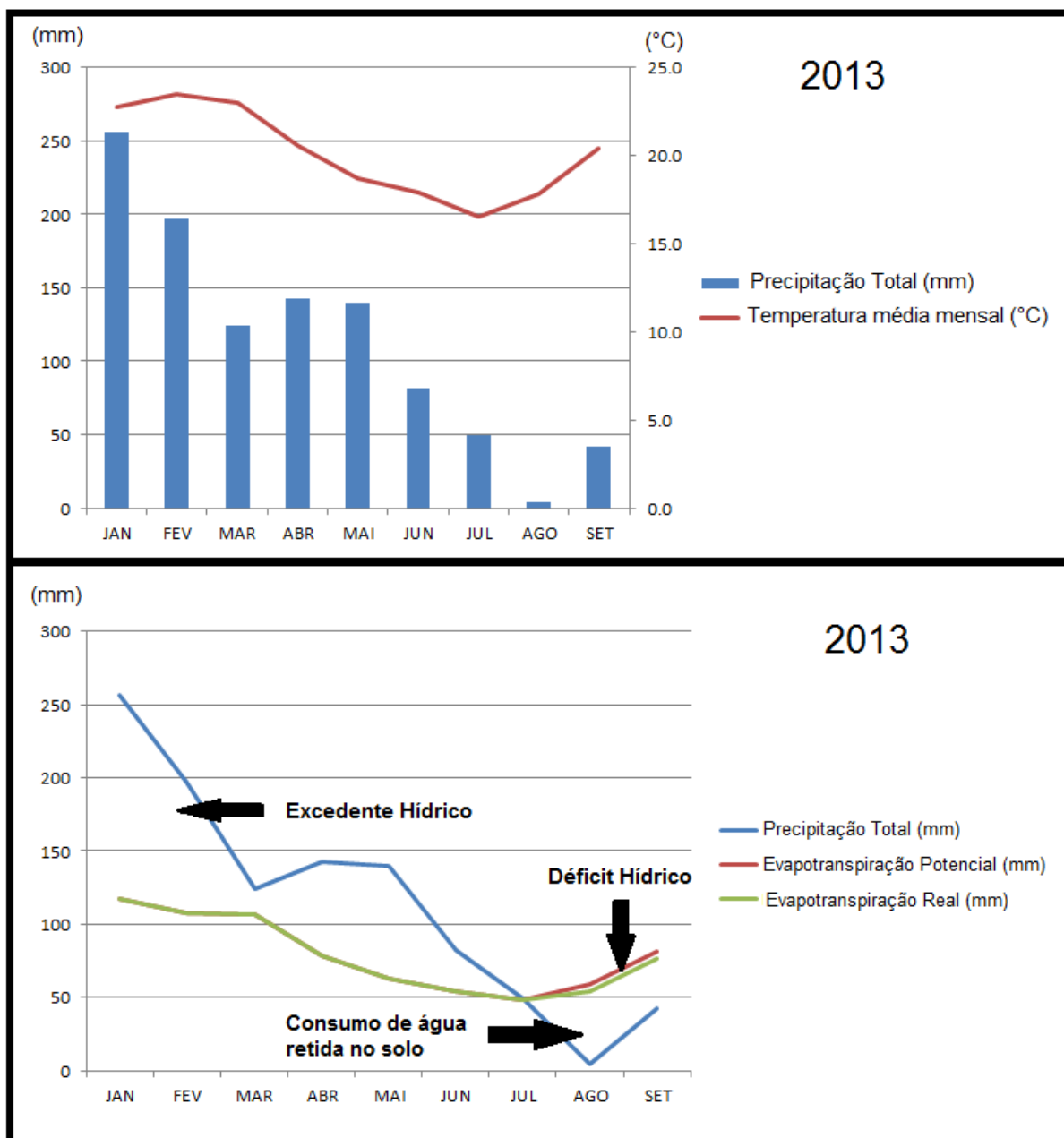


Figura 33 – Gráfico do balanço hídrico (janeiro/2013 a setembro/2013) e histograma com a variação da precipitação total mensal e a temperatura média mensal.

Entre os meses de abril e setembro foram realizadas medições do nível d'água em todos os poços de monitoramento da área de estudo (Tabela 4). A figura 34 apresenta gráficos da variação do nível d'água.

Tabela 4 – Valores de nível d'água medidos entre abril e setembro de 2013. Em vermelho: valores de N.A a partir da superfície do terreno. Em preto: poço seco. (-) medição não efetuada.

Poço	Profundidade do nível d'água (m)			
	Campanhas			
	16/04/2013	28/08/2013	09/09/2013	26/09/2013
A	3.31	4.02	4.28	>4.59
B	4.66	5.29	5.37	>7.09
C	>7.11	>7.11	6.30	>7.11
D	7.22	>7.67	>7.67	>7.67
E	4.04	4.70	>6.34	>6.34
F	2.47	3.06	3.14	>4.10
G	>6.89	>6.89	>6.89	>6.89
H	>6.00	>6.00	>6.00	>6.00
I	>2.10	>2.10	>2.10	>2.10
J	>5.85	>5.85	>5.85	>5.85
K	3.75	>4.94	>4.94	>4.94
L	4.29	>4.95	>4.95	>4.95
M1	6.96	7.46	>17.32	>17.32
M2	>7.97	>7.97	>7.97	>7.97
N	>1.74	>1.74	>1.74	>1.74
O	6.03	6.47	6.48	>18.60
1	0.67	>0.83	>0.83	>0.83
2	0.59	>1.93	>1.93	>1.93
3	>1.99	>1.99	>1.99	>1.99

Os poços de monitoramento G, H, I, J, M2 e N apresentaram-se secos em todas as campanhas.

Observa-se que no período em que as medições foram realizadas, especialmente entre os meses das campanhas geofísicas (julho e setembro), a profundidade em que se encontrava o nível d'água aumentou em quase todos os poços.

Na última campanha, realizada no final do mês de setembro, todos os poços da área estavam secos.

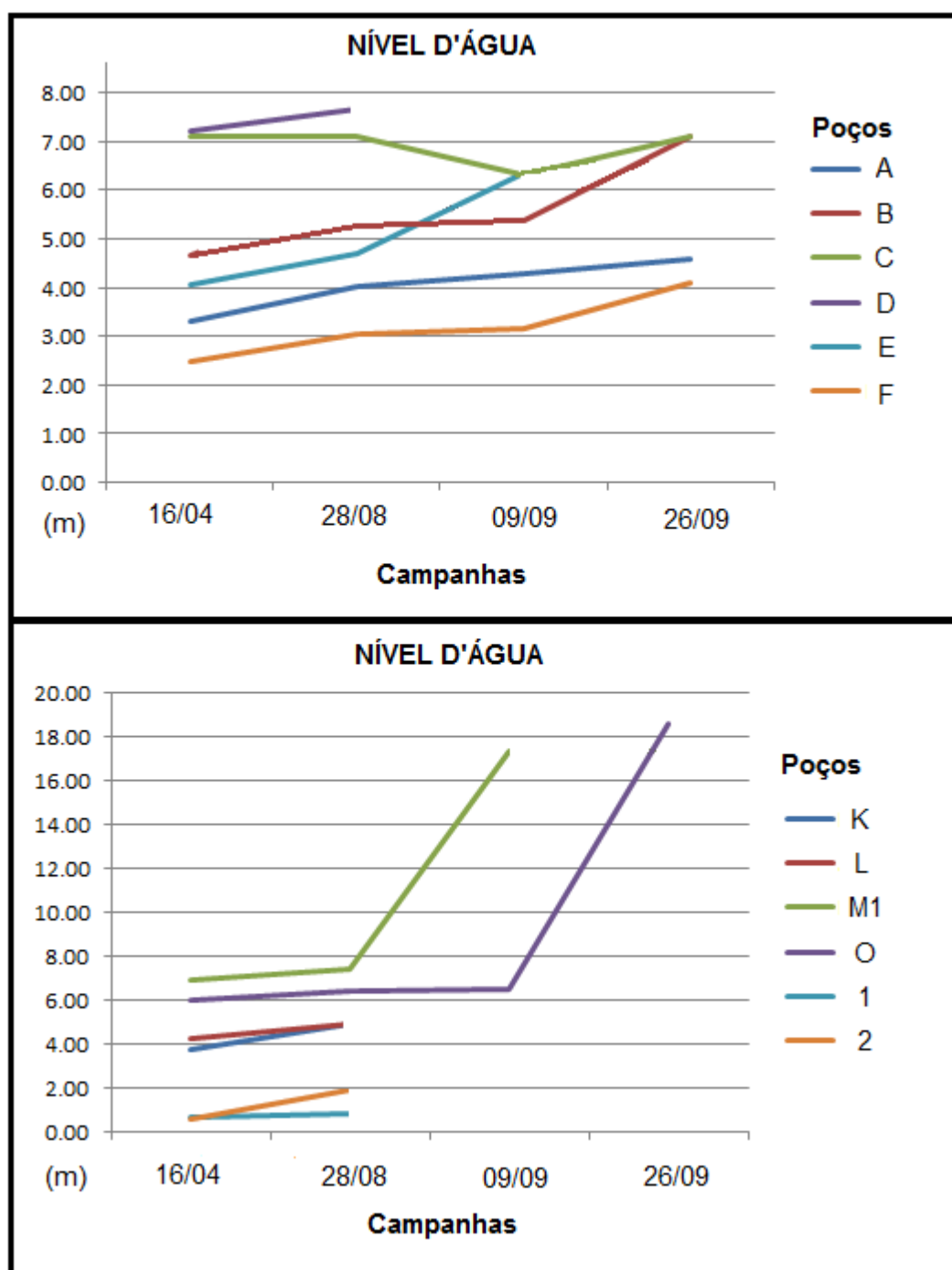


Figura 34 – Medições do nível d'água em campanhas realizadas entre abril e setembro de 2013. AS linhas interrompidas significam que o poço naquela campanha estava seco (nível d'água abaixo da seção filtrante do poço).

7. INTERPRETAÇÃO DOS DADOS E DISCUSSÃO

7.1 Caminhamento Elétrico (CE)

Em uma análise geral feita nas linhas 1, 2 e 3 percebe-se que há certo padrão de resistividade variando conforme a espessura da zona saturada. A partir da linha 1 até a linha 3 (descendo a topografia no sentido da lagoa), pode-se observar que há valores mais altos de resistividade nas porções mais próximas da superfície (linhas 1 e 2) e à medida em que se aproxima da lagoa (linha 3) esses valores de resistividade diminuem.

Isso está de acordo com o esperado uma vez que o nível d'água medido próximo da lagoa está mais próximo da superfície em relação aos níveis medidos em áreas topograficamente mais elevadas, em direção às linhas de alta tensão.

Os valores mais elevados de resistividade encontram-se em profundidades que variam de 1,0 m (linha 3) até 10,0 m (linhas 1 e 2). Esses valores diminuem conforme o aumento da profundidade até atingir o provável nível d'água ou zona saturada.

Em primeiro momento, acreditava-se que os altos valores de resistividade encontrados entre os primeiros 5,0 a 10,0 m de profundidade na porção oeste (zona de plantio do eucalipto) eram referentes a uma camada de argila. Porém, com a execução das sondagens ST-1 e ST-2 provou-se que o material descrito na realidade é uma camada de areia fina/média com coloração marrom escura nas porções superiores tornando-se marrom clara e ocre com o aumento da profundidade.

Diante disso, os altos valores de resistividade encontrados na porção que compreende a plantação de eucalipto estão vinculados somente com as características hídricas do solo e não com as características litológicas.

Ao comparar as campanhas de julho e setembro nota-se que há um aumento nos valores de resistividade medidos nas três linhas citadas, em geral, e especialmente na porção oeste da área, onde se encontrava a plantação de eucalipto (Figuras 35 a 37).

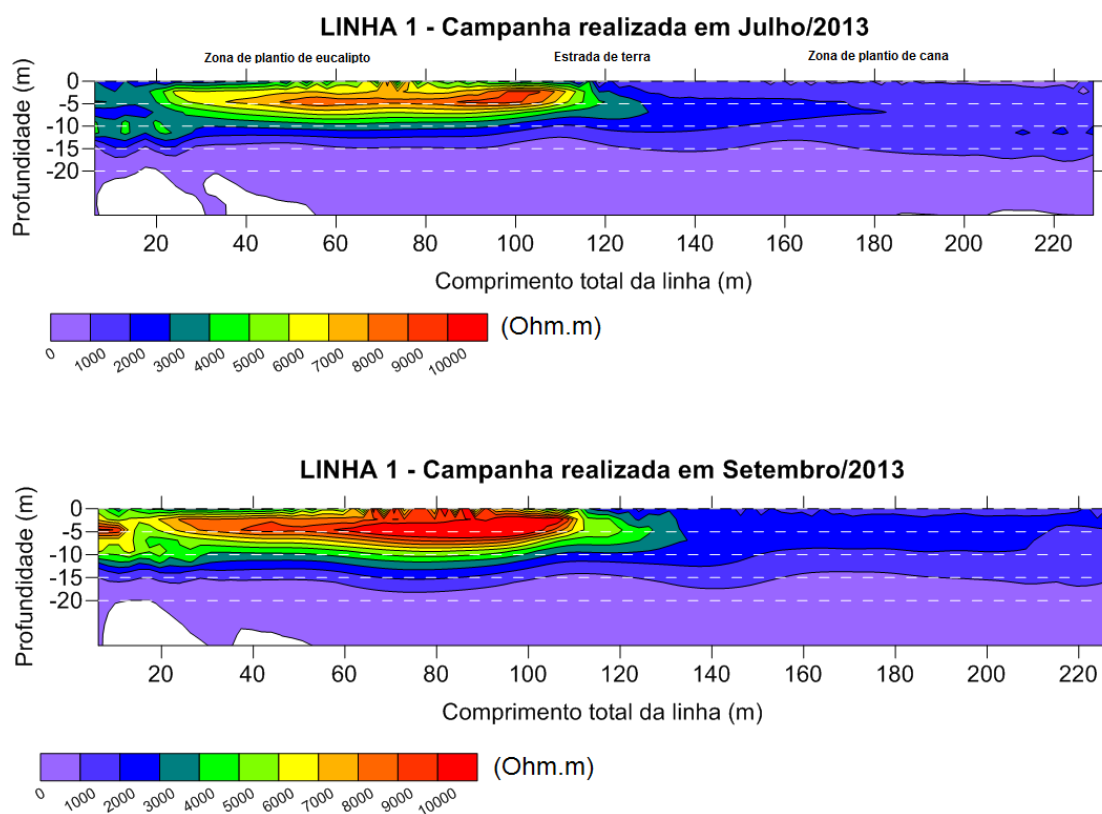


Figura 35 – Perfis de resistividade referentes à Linha 1 das campanhas de julho/2013 e setembro/2013. Software SURFER versão 9.

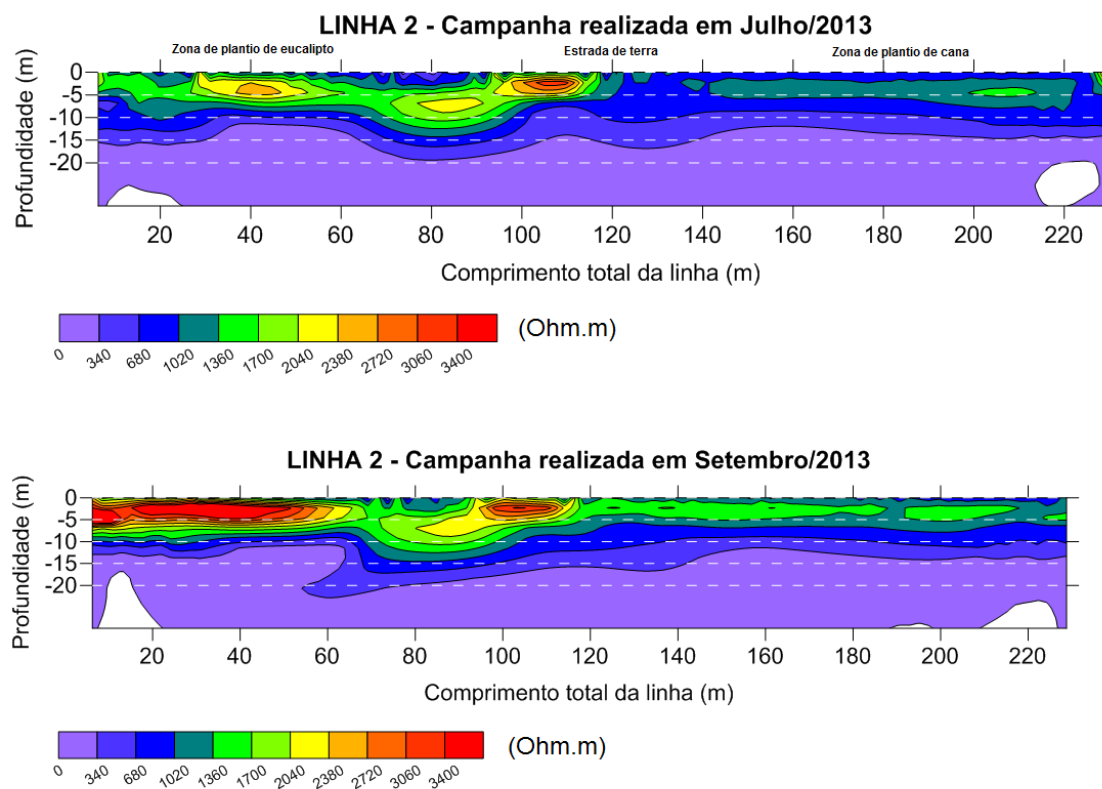


Figura 36 – Perfis de resistividade referentes à Linha 2 das campanhas de julho/2013 e setembro/2013. Software SURFER versão 9.

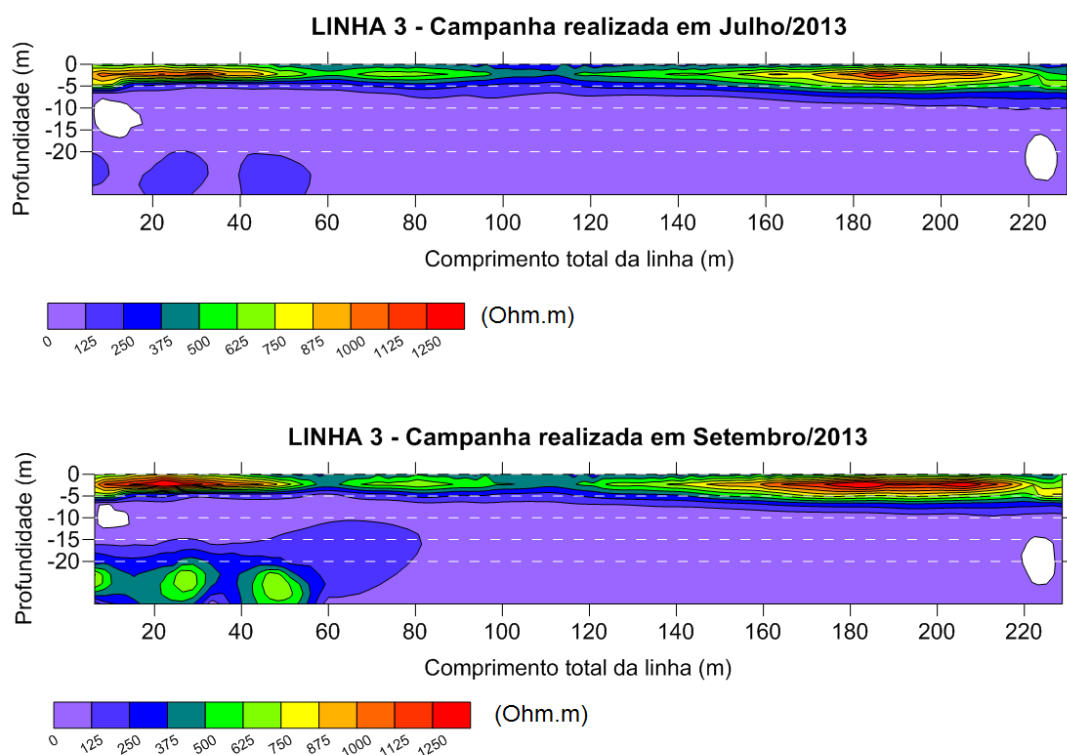


Figura 37 – Perfis de resistividade referentes à Linha 3 das campanhas de julho/2013 e setembro/2013. Software SURFER versão 9.

A linha 4 foi feita perpendicularmente às curvas de nível ao longo da estrada de terra que divide as propriedades e, portanto, entre o plantio do eucalipto e cana-de-açúcar, desde a lagoa até as linhas de alta tensão. Os resultados mostram valores elevados de resistividade na porção mais alta do terreno (Figura 38).

Ao comparar as campanhas realizadas em julho e setembro, nota-se que também há aumento nos valores de resistividade próximos à superfície como foi observado para as linhas 1, 2 e 3.

As linhas 5 e 6, realizadas dentro da plantação de eucalipto apresentam valores elevados de resistividade próximo a superfície por toda a sua extensão (Figuras 39 e 40).

Concordando com estes resultados as linhas 1 e 2 nos primeiros 120,0 m até a estrada de terra, também apresentam valores altos de resistividade onde se encontra a plantação de eucalipto.

Os valores de resistividade também aumentam quando comparadas as campanhas realizadas em julho e setembro.

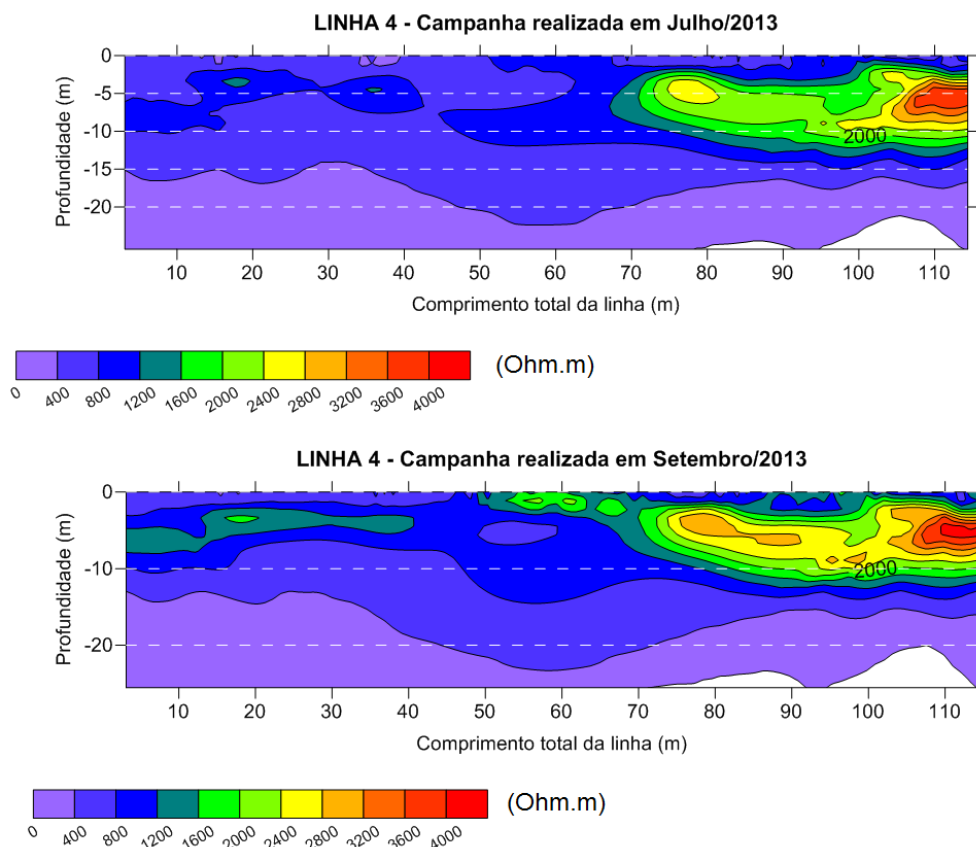


Figura 38 – Perfis de resistividade referentes à Linha 4 das campanhas de julho/2013 e setembro/2013. Software SURFER versão 9.

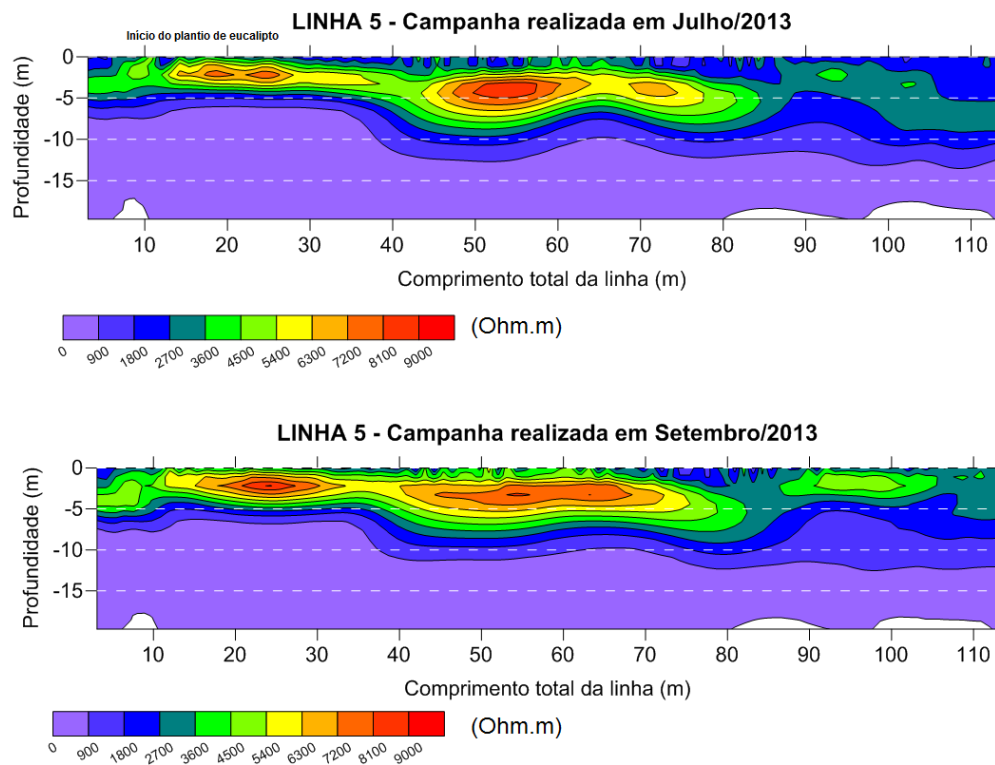


Figura 39 – Perfis de resistividades referentes à Linha 5 das campanhas de julho/2013 e setembro/2013. Software SURFER versão 9.

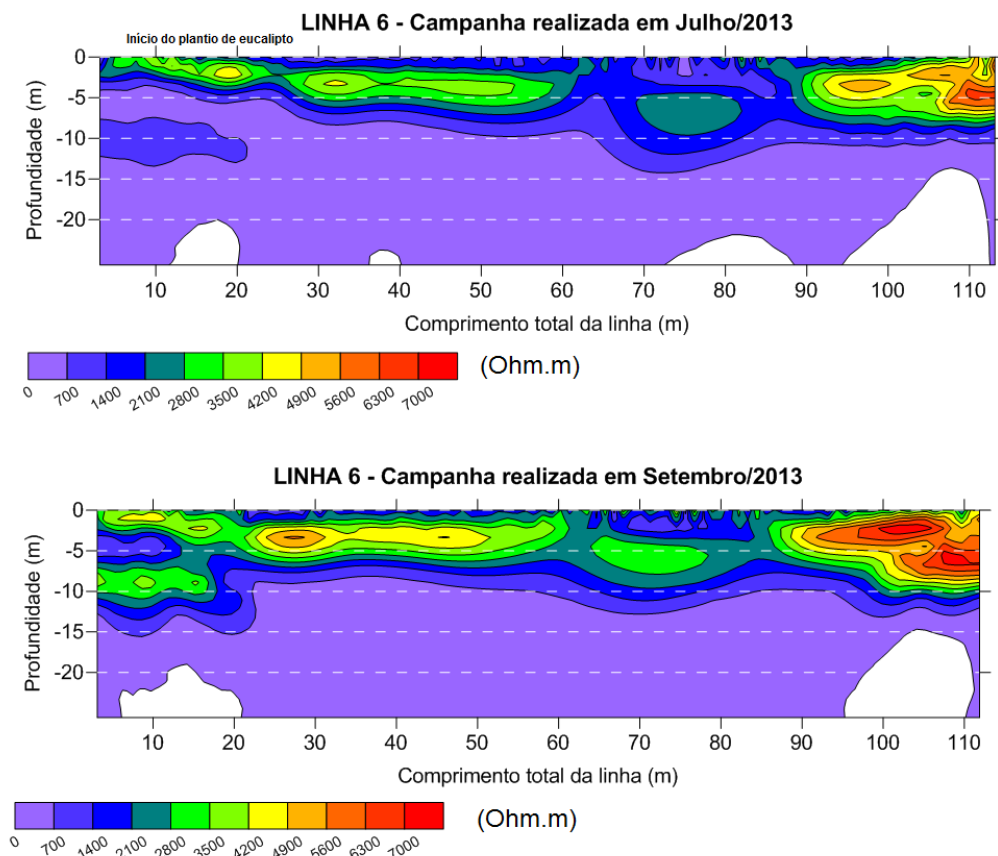


Figura 40 – Perfis de resistividade referentes à Linha 6 das campanhas de julho/2013 e setembro/2013. Software SURFER versão 9.

As raízes de eucalipto absorvem maiores quantidades de água proveniente da zona não saturada, uma vez que a maioria de suas raízes encontra-se nesta porção. Sendo assim, quando ativas nesta zona, podem ser responsáveis por impedir a recarga do aquífero, caso a quantidade de chuva não seja maior que a demanda das árvores.

Com o corte do eucalipto em meados de agosto, esperava-se que a campanha realizada em setembro detectasse valores de resistividade menores em níveis superficiais, uma vez que as raízes do eucalipto deixariam de absorver água, aumentando os valores de umidade do solo e permitindo, até certo ponto, a recarga do aquífero e diminuição da resistividade consequentemente.

Porém, o que pode ser observado foi aumento de resistividade em todas as linhas de caminhamento, especialmente nas zonas de plantio de eucalipto, o que pode ser atribuído à baixa pluviosidade no período entre as campanhas, insuficiente para modificar substancialmente a condição local.

O balanço hídrico realizado no período que compreende os meses de janeiro a setembro de 2013 (Figura 33), mostrou que a partir de julho a curva de precipitação média mensal da região estudada estava abaixo das curvas de evapotranspiração potencial e real,

iniciando o período de consumo de água retida no solo. De julho até meados de agosto as raízes do eucalipto ainda estavam absorvendo grande quantidade de água da zona não saturada. Com o corte do eucalipto em meados de agosto, as raízes pararam de absorver água da zona não saturada justamente no período de déficit hídrico da região.

De acordo com as medições de nível d'água em campanhas realizadas nos dias 28/08, 09 e 26/09, o nível d'água da região teve uma queda constante resultando na secagem de todos os poços no final de setembro.

Sendo assim, ao realizar a segunda campanha geofísica no final de setembro, o solo já se encontrava seco ou com umidade muito baixa se comparada com a campanha realizada no começo de julho, o que pode explicar o aumento dos valores de resistividade detectados próximos à superfície do terreno em todos os perfis de caminhamento elétrico.

7.2 Sondagem Elétrica Vertical (SEV)

A campanha de aquisição das SEV foi realizada no final de agosto.

Em geral, os dados apontam 3 estratos geoeletricos principais. A tabela 5 mostra a relação das SEV com as profundidades dos estratos geoeletricos e nível d'água aparente.

Tabela 5 – Relação entre as profundidades dos estratos geoeletricos e o nível d'água aparente. A base da Camada 2 (início da camada 3- em azul) indica o provável nível d'água.

SEV	Início da Camada 1 (m)	Início da Camada 2 (m)	Início da Camada 3 (m)
1	0	0.80	7.88
2	0	0.70	7.04
3	0	0.75	7.18
4	0	0.439	5.55
5	0	1.21	4.48
6	0	0.5	1.21
7	0	0.729	2.5
8	0	3.54	8.57
9	0	1.68	7.61
10	0	2.65	6.73

A camada 1, em geral, apresenta espessura média de 1,29 m variando de 0,44 m próximo à lagoa até 1,68 m nas porções mais ao norte da área. Esta camada pode ser interpretada como sendo o solo e os primeiros níveis de areia.

A base da camada 2 apresenta profundidade média de 5.87 m e indica o provável nível d'água da região variando de 1,21 metros próximo à lagoa até quase 8,00 m nas porções mais ao norte da área.

A SEV 10 foi realizada ao lado do poço de monitoramento “O” e apresenta o provável nível d’água em 6,73 metros. Junto com a aquisição geofísica foi realizada a medição do nível d’água nos poços de monitoramento e o poço “O” apresentou valor em torno de 6,47 metros.

A camada 3 são mais profundas e apresentam profundidades da base da camada em geral a 14,20 metros, variando de 7,18 metros próximo à lagoa e 24,9 metros nas porções mais ao norte da área. Apresentam valores menores de resistividade devido ao material que compõe a geologia local, e também por já fazer parte da zona saturada.

A tabela 6 mostra a relação da profundidade do nível d’água medido em campo com a profundidade do nível d’água detectado pelas SEV próximas aos poços de monitoramento.

Tabela 6 – Profundidade do N.A medido em relação aos detectados pelas SEV próximas a alguns poços de monitoramento.

Campanhas			
27/08/2013		28/08/2013	
SEV	Provável Nível d'água (m)	Nível água (m)	Poço
3	7.18	>6.00	H
4	5.55	>7.11	C
		5.29	B
6	1.21	>0.83	1
7	2.5	>1.74	N
		>1.93	2
8	7.45	> 6.89	G
		> 5.85	J
10	6.73	6.47	O
Obs: os valores com (>) significa que o poço estava seco			

7.3 Potencial Espontâneo (SP)

Os dados e o mapa confeccionado de potencial espontâneo com as curvas de isovalores em milivolts (mV) indicam que a direção de fluxo preferencial da região é de sul para norte (S/N) (Figuras 30 e 31).

Concordando com este resultado, o mapa potenciométrico da área (Figura 41), indica que o fluxo subterrâneo também está de sul para norte (da lagoa para as linhas de alta tensão).

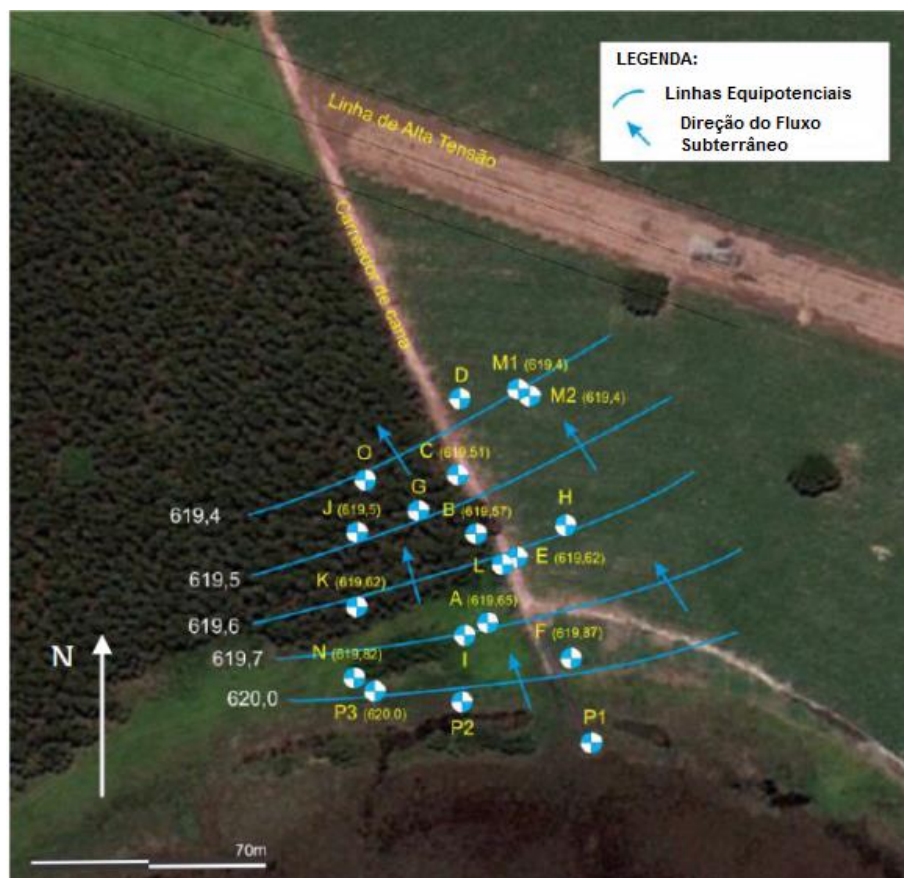


Figura 41 – Mapa potenciométrico sobre imagem Google Earth®.

8. CONCLUSÕES

Ao longo dos meses de julho e setembro de 2013, foram realizadas duas campanhas geofísicas de caminhamento elétrico sendo a primeira antes do corte de uma plantação de eucalipto e a segunda após o corte.

Partindo do princípio que as raízes do eucalipto absorvem grandes quantidades de água provenientes da zona não saturada de um sistema aquífero, esperava-se que com o corte do eucalipto em meados do mês de agosto os valores de resistividade do solo medidos na campanha de setembro diminuíssem.

Porém, ao comparar as campanhas antes do corte e depois, os dados obtidos em campo indicaram um aumento na resistividade do solo próximo à superfície em todas as linhas de caminhamento.

Após realizar o balanço hídrico, concluiu-se que o período em que foram realizadas as campanhas geofísicas é considerado com sendo o de consumo da água retida no solo e déficit hídrico da região. Sendo assim, o aumento dos valores de resistividade do solo próximos à superfície está vinculado diretamente com as características hídricas do solo e

com as características climáticas em que a área de estudo se enquadra e não pela influência do eucalipto no sistema aquífero como um todo.

Para melhorar a precisão do experimento, seria necessário um período de trabalho maior, para avaliar (através dos métodos elétricos) os impactos do eucalipto na área de estudo em períodos de muita chuva (dezembro, janeiro e fevereiro), uma vez que este trabalho foi realizado somente nas épocas mais secas do ano (julho, agosto e setembro).

Diante disso, e das condições em que o trabalho foi realizado, o método da Eletrorresistividade utilizando da técnica do Caminhamento Elétrico apresentou resultados satisfatórios para avaliar a influência do eucalipto nos aquíferos rasos.

A aplicação da técnica da Sondagem Elétrica Vertical para investigar o provável nível d'água da área, e o método do Potencial Espontâneo para investigar a direção preferencial do fluxo subterrâneo, também apresentaram resultados satisfatórios. Porém, se comparados com os dados de investigação direta (poços de monitoramento) possuem menor precisão.

O provável nível d'água indicado pelas SEV posicionadas perto de alguns poços de monitoramento apresentaram valores bem próximos dos medidos diretamente nos poços, variando de 1,20 m próximo à lagoa e 8,0 m em áreas topograficamente mais elevadas.

Já o mapa de potencial espontâneo, assim como o mapa potenciométrico, indicou direção preferencial de fluxo subterrâneo para o norte da área.

9. BIBLIOGRAFIA

- Bjornberg A. J. S. & Landim P. M. B. 1966. Contribuição ao estudo da Formação Rio Claro (Neocenozóico). São Paulo: Boletim Sociedade Brasileira de Geologia, **15**(4):43-68.
- Bortolin J. R. M. & Malagutti Filho W. 2012. Monitoramento temporal da pluma de contaminação no aterro de resíduos urbanos de Rio Claro (SP) por meio do método geofísico da eletrorresistividade. Geologia USP, Série Científica, **12**(3):99-113.
- Braga A. C. O. 2006. Métodos da eletrorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: uma abordagem metodológica e prática. 2006. Tese de Livre Docência, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro, São Paulo, 121 p.
- Braga A. C. O. 2008. Estimativa da vulnerabilidade natural de aquíferos: uma contribuição a partir da resistividade e condutância longitudinal. Revista Brasileira de Geofísica (2008) **26**(1):61-68.
- DAEE - DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. 1981. Estudo de águas subterrâneas, Região Administrativa 5 (Campinas), SP. São Paulo, DAEE, **2**.
- EPA - UNITED STATE ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 2001. A Citizens Guide to Phytoremediation: The Citizen's Guide Series. Washington, DC. EPA 542-F-01-002.
- Freitas R. O., Mezzalira S., Oda G. H., Vieira P. C., Torres C. C., Hachiro J., Tominaga L. K., Dehira L. K., Massoli M., Azevedo A. A. B., Pressinoti M. M. N. 1979. Projeto de levantamento geológico de formações superficiais. In: Simpósio Regional de Geologia, Rio Claro, **2**:263-277.
- Fulfaro V. I., Suguio K. 1968. A Formação Rio Claro, Neocenozóico, e seu ambiente de deposição. Revista do Instituto Geográfico Geológico (IGG), São Paulo, **20**:45-60.
- Gallas J. D. F. 2000. Principais métodos geoeletricos e suas aplicações em prospecção mineral, hidrogeologia, geologia de engenharia e geologia ambiental. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP), Rio Claro, 174 p.
- Gallas J. D. F. 2005. O método do potencial espontâneo (SP): uma revisão sobre suas causas, seu uso histórico e suas aplicações atuais. São Paulo: Revista Brasileira de Geofísica, **23**(2):133-144.
- Gandolfo O. C. B. 2007. Um estudo do imageamento geoeletrico na investigação rasa. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 215p.

GOOGLE EARTH. Programa acessado em 29/03/2013.

Kearey P., Brooks M., Hill, I. 2009. Geofísica de Exploração (Tradução de Maria Cristina Moreira Coelho). São Paulo, Oficina de Textos, 438 p.

Milani E. J. 2004. Comentários sobre a origem e evolução tectônica da Bacia do Paraná. In: Mantesso Neto V., Bartorelli A., Carneiro C.D.R., Brito Neves B.B. (eds.) Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo, Editora Beca, p. 265-279.

Mota F. S. 1986. Aspectos agro-meteorológicos da água na atmosfera. Meteorologia Agrícola, Balanço Hídrico, p.243-309.

Oliva A. 2006. Estudo hidrogeológico da Formação Rio Claro no Município de Rio Claro – SP. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Rio Claro, 196 p.

Orellana E. S. 1972. Prospección geoeleétrica en corriente continua. Madrid, Paraninfo, 523p.

Parasnis D. S. 1986. Principles of Applied Geophysics. New York, Chapman & Hall, 402 p.

Saraiva F. A. 2010. Avaliação de métodos geofísicos no comportamento espacial de plumas de necrochorume. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 93 p.

Schneider R. L., Muhlmann H., Tommasi E., Medeiros R.A., Daemon R. F., Nogueira A. A. 1974. Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. In: Congresso Brasileiro de Geologia, Porto Alegre, 1:41-65.

Sentelhas P. C., Pereira A. R., Marin F. R., Angelocci L. R., Alfonsi R. R., Caramori P. H., Swart S. 2003. Balanços hídricos climatológicos de 500 localidades brasileiras. BHBRASIL [S.I.]

Telford W. M., Geldart L. P., Sheriff R. E. 1990. Applied Geophysics (2ª edição). Cambridge University Press. 770 p.

Thornthwaite C. W., Mather J. R. 1955. The water balance. Publications in climatology. Laboratory of climatology, New Jersey, v.8, 104p.

WHO - WORLD HEALTH ORGANIZATION. 2007. Nitrate and nitrite in drinking water. Back ground document for development of WHO Guidelines for Drinking-water quality. WHO Publications, Geneva, Switzerland, 29 p.

Zaine J. E. 1994. Geologia da Formação Rio Claro na folha Rio Claro (SP). Dissertação de Mestrado - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP), Rio Claro, 90 p.

APÊNDICE 1

TABELAS COM OS VALORES DE
RESISTIVIDADE OBTIDOS ATRAVÉS DAS SEV
E COORDENADAS (UTM)

SEV - 1				
Coordenadas UTM : 229187/7517850				
AB/2	MN/2	K	DV/I	p
1.50	0.50	6.28	152.900	960.212
2.00	0.50	11.78	88.000	1036.640
3.00	0.50	27.48	49.300	1354.760
4.00	0.50	49.48	31.600	1563.570
5.00	0.50	77.75	22.400	1741.600
6.00	0.50	112.31	16.110	1806.310
8.00	0.50	200.27	9.050	1812.440
10.00	0.50	313.37	5.360	1679.660
13.00	0.50	530.14	2.560	1357.160
15.00	0.50	706.07	1.672	1180.550
20.00	0.50	1255.85	0.588	738.440
25.00	0.50	1962.71	0.275	539.750
30.00	0.50	2826.64	0.143	404.210
40.00	0.50	5025.76	0.046	231.180
50.00	0.50	7853.19	0.016	125.650
60.00	0.50	11308.94	0.010	113.080

SEV - 2				
Coordenadas UTM : 229249/7517844				
AB/2	MN/2	K	DV/I	p
1.50	0.50	6.28	177.700	1115.950
2.00	0.50	11.78	114.700	1351.170
3.00	0.50	27.48	60.500	1662.540
4.00	0.50	49.48	36.700	1815.920
5.00	0.50	77.75	23.900	1858.230
6.00	0.50	112.31	17.400	1924.990
8.00	0.50	200.27	9.770	1956.640
10.00	0.50	313.37	6.220	1949.160
13.00	0.50	530.14	3.580	1897.900
15.00	0.50	706.07	2.640	1864.020
20.00	0.50	1255.85	1.223	1535.900
25.00	0.50	1962.71	0.670	1315.020
30.00	0.50	2826.64	0.377	1065.640
40.00	0.50	5025.76	0.131	658.370
50.00	0.50	7853.19	0.050	392.660

SEV - 3				
Coordenadas UTM : 229260/7517798				
AB/2	MN/2	K	DV/I	p
1.50	0.50	6.28	155.600	977.170
2.00	0.50	11.78	105.600	1243.970
3.00	0.50	27.48	49.700	1365.760
4.00	0.50	49.48	26.600	1316.170
5.00	0.50	77.75	16.940	1317.090
6.00	0.50	112.31	11.200	1257.870
8.00	0.50	200.27	5.640	1129.520
10.00	0.50	313.37	3.140	983.980
13.00	0.50	530.14	1.596	846.100
15.00	0.50	706.07	1.064	751.260
20.00	0.50	1255.85	0.458	575.180
25.00	0.50	1962.71	0.224	439.650
30.00	0.50	2826.64	0.115	325.060
40.00	0.50	5025.76	0.035	175.900
50.00	0.50	7853.19	0.014	109.940

SEV - 4				
Coordenadas UTM : 229209/7517800				
AB/2	MN/2	K	DV/I	p
1.50	0.50	6.28	288.000	1808.640
2.00	0.50	11.78	190.300	2241.730
3.00	0.50	27.48	77.000	2115.960
4.00	0.50	49.48	40.100	1984.150
5.00	0.50	77.75	24.200	1881.550
6.00	0.50	112.31	14.920	1675.660
8.00	0.50	200.27	6.680	1337.800
10.00	0.50	313.37	3.380	1059.190
13.00	0.50	530.14	1.430	758.100
15.00	0.50	706.07	0.882	622.740
20.00	0.50	1255.85	0.328	411.920
25.00	0.50	1962.71	0.131	257.120
30.00	0.50	2826.64	0.062	175.250
40.00	0.50	5025.76	0.019	95.490
50.00	0.50	7853.19	0.008	62.830
60.00	0.50	11308.94	0.002	22.620
80.00	0.50	20105.40	0.0003	6.00

SEV - 5				
Coordenadas UTM : 229304/7517737				
AB/2	MN/2	K	DV/I	p
1.50	0.50	6.28	80.300	504.280
2.00	0.50	11.78	51.700	609.030
3.00	0.50	27.48	27.500	755.700
4.00	0.50	49.48	17.170	849.570
5.00	0.50	77.75	11.250	874.690
6.00	0.50	112.31	7.920	889.490
8.00	0.50	200.27	3.920	785.060
10.00	0.50	313.37	2.280	714.480
13.00	0.50	530.14	1.023	542.330
15.00	0.50	706.07	0.611	431.400
20.00	0.50	1255.85	0.175	219.770
25.00	0.50	1962.71	0.048	94.210
30.00	0.50	2826.64	0.014	39.570
40.00	0.50	5025.76	0.003	15.080
50.00	0.50	7853.19	0.002	15.700
60.00	0.50	11308.94	0.0015	16.960

SEV - 6				
Coordenadas UTM : 229234/7517740				
AB/2	MN/2	K	DV/I	p
1.50	0.50	6.28	85.300	533.980
2.00	0.50	11.78	48.600	572.510
3.00	0.50	27.48	18.780	516.070
4.00	0.50	49.48	9.220	456.210
5.00	0.50	77.75	5.760	447.840
6.00	0.50	112.31	3.670	412.180
8.00	0.50	200.27	1.648	330.040
10.00	0.50	313.37	0.833	261.040
13.00	0.50	530.14	0.310	164.340
15.00	0.50	706.07	0.164	115.800
20.00	0.50	1255.85	0.050	62.790
25.00	0.50	1962.71	0.022	43.180
30.00	0.50	2826.64	0.012	33.920
40.00	0.50	5025.76	0.0049	24.630
50.00	0.50	7853.19	0.0024	18.850
60.00	0.50	11308.94	0.0022	24.880
80.00	0.50	20105.40	0.0018	36.19

SEV - 7				
Coordenadas UTM : 229157/7517723				
AB/2	MN/2	K	DV/I	p
1.50	0.50	6.28	384.000	2411.520
2.00	0.50	11.78	210.000	2473.800
3.00	0.50	27.48	90.200	2478.700
4.00	0.50	49.48	43.100	2132.590
5.00	0.50	77.75	22.400	1741.600
6.00	0.50	112.31	10.170	1142.190
8.00	0.50	200.27	2.980	596.800
10.00	0.50	313.37	1.022	300.260
13.00	0.50	530.14	0.271	143.670
15.00	0.50	706.07	0.152	107.300
20.00	0.50	1255.85	0.0708	88.910
25.00	0.50	1962.71	0.060	117.760
30.00	0.50	2826.64	0.0304	85.930
40.00	0.50	5025.76	0.0316	158.810
50.00	0.50	7853.19	0.0141	110.730

SEV - 8				
Coordenadas UTM : 229165/7517795				
AB/2	MN/2	K	DV/I	p
1.50	0.50	6.28	173.100	1087.070
2.00	0.50	11.78	99.500	1172.110
3.00	0.50	27.48	41.200	1132.180
4.00	0.50	49.48	20.500	1014.340
5.00	0.50	77.75	12.410	964.880
6.00	0.50	112.31	8.680	974.850
8.00	0.50	200.27	4.690	939.270
10.00	0.50	313.37	3.170	993.380
13.00	0.50	530.14	2.130	1129.200
15.00	0.50	706.07	1.651	1167.720
20.00	0.50	1255.85	0.978	1140.080
25.00	0.50	1962.71	0.519	1018.640
30.00	0.50	2826.64	0.276	780.152
40.00	0.50	5025.76	0.054	271.390
50.00	0.50	7853.19	0.017	133.500

SEV - 9				
Coordenadas UTM : 229125/7517857				
AB/2	MN/2	K	DV/I	p
1.50	0.50	6.28	695.000	4364.600
2.00	0.50	11.78	385.000	4535.300
3.00	0.50	27.48	179.600	4935.400
4.00	0.50	49.48	101.800	5037.060
5.00	0.50	77.75	69.400	5395.850
6.00	0.50	112.31	48.600	5458.830
8.00	0.50	200.27	25.800	5166.970
10.00	0.50	313.37	16.620	5208.210
13.00	0.50	530.14	7.970	4225.220
15.00	0.50	706.07	5.340	3770.410
20.00	0.50	1255.85	1.984	2491.600
25.00	0.50	1962.71	0.930	1825.320
30.00	0.50	2826.64	0.607	1715.770
40.00	0.50	5025.76	0.243	1221.250
50.00	0.50	7853.19	0.198	1554.000

SEV - 10				
Coordenadas UTM : POÇO O				
AB/2	MN/2	K	DV/I	p
1.50	0.50	6.28	785.000	4929.800
2.00	0.50	11.78	425.000	5006.500
3.00	0.50	27.48	189.300	5201.960
4.00	0.50	49.48	92.200	4562.050
5.00	0.50	77.75	49.800	3871.950
6.00	0.50	112.31	30.000	3369.300
8.00	0.50	200.27	13.000	2763.720
10.00	0.50	313.37	7.110	2228.060
13.00	0.50	530.14	3.160	1675.240
15.00	0.50	706.07	1.887	1332.350
20.00	0.50	1255.85	0.650	816.300
25.00	0.50	1962.71	0.402	789.000
30.00	0.50	2826.64	0.273	771.720
40.00	0.50	5025.76	0.110	552.820
50.00	0.50	7853.19	0.090	706.780
60.00	0.50	11308.94	0.0599	677.400

APÊNDICE 2

TABELA COM OS VALORES DE POTENCIAL
ESPONTÂNEO MEDIDOS EM CAMPO (mV) E
COORDENADAS (UTM)

Distância percorrida pelos eletrodos (m)		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240
Linha 1		48,7	49,5	38,5	42,0	39,7	22,0	30,0	28,5	7,1	15,0	-19	-19,7	15,8 / 23,4	14,5	33,6	47,3	52,1	56,5	65,4	66,0	71,3	90,8	93,00	104,5	91,5
Linha 1,5		72,3	63,0	67,7	54,3	55,2	25,1	34,3	39,2	-23,1	8,6	2,8	-15,5	6,5 / 25,4	1,0	16,9	22,3	34,9	18,7	27,7	25,6	31,0	34,2	46,3	40,5	54,9
Linha 2		82,2	71,1	40,2	31,4	40,5	57,4	60,5	58,8	52,0	32,3	6,0	-11,6	-1,0	2,0	12,9	22,6	18,5	20,0	22,0	14,4	22,3	22,6	30,1	35,0	47,0
Linha 2,5		43,0	30,7	21,5	47,1	40,0	47,8	57,5	45,0	42,1	24,4	23,3	-13,1	20,0 / 13,4	3,1	12,5	16,2	20,0	27,7	20,0	22,2	23,4	23,3	27,8	32,6	36,5
Linha 3		-21,6	-13,6	-12,3	-9,0	-9,4	-2,9	-10,8	-16,7	-13,2	-12,2	-9,4	-13,3	-10,8	-10,4	-1,5	6,6	5,6	16,3	12,6	9,7	11,5	23,1	22,2	33,5	34,0

Base Fixa

COORDENADAS UTM									
Ponto (m)	0	40	90	120	140	190	240		
Linha 1	229086 / 7517861	229107 / 7517857	229153 / 7517851	229184 / 7517851	229204 / 7517849	229555 / 7517850	229302 / 7517843		
Linha 1,5	229077 / 7517825	229115 / 7517825	229168 / 7517827	229196 / 7517823	229214 / 7517823	229266 / 7517821	229313 / 7517819		
Linha 2	229089 / 7517800	229130 / 7517799	229168 / 7517800	229207 / 7517798	229227 / 7517798	229277 / 7517794	229327 / 7517793		
Linha 2,5	229102 / 7517776	229140 / 7517777	229191 / 7517777	229217 / 7517775	229339 / 7517776	229288 / 7517775	229335 / 7517776		
Linha 3	229120 / 7517713	229159 / 7517719	229205 / 7517733	229236 / 7517742	229255 / 7517742	229304 / 7517748	229375 / 751756		

APÊNDICE 3

TABELA COM OS DADOS UTILIZADOS PARA O CÁLCULO DO BALANÇO HÍDRICO

A estação meteorológica está situada nas dependências da UNESP, em Rio Claro, São Paulo, e suas coordenadas geográficas são 22º 23' lat. S e 47º 32' long. W.

Estação CEAPLA - UNESP - Rio Claro (SP)		Manual x Mmensal	Latitude	Tab x Cor	Pre - Etp	Tabela cc - 300	Tabela cc - 300	Mês atual - anterior do ARM	Pre - Etp - Alt	Etp - def	P-Etp-Alt
Meses	PRE Total	T (°C) Média	COR	ETP (mm)	P-ETP (mm)	Neg. Acum. (mm)	ARM (mm)	ALT (mm)	DEF (mm)	ETR (mm)	EXC (mm)
JAN	256.2	22.8	34.5	117.3	138.9	0.0	300.0	0.0	0.0	117.3	138.9
FEV	197.4	23.5	30.0	108.0	89.4	0.0	300.0	0.0	0.0	108.0	89.4
MAR	124.6	23.0	31.5	107.1	17.5	0.0	300.0	0.0	0.0	107.1	17.5
ABR	142.6	20.6	29.1	78.6	64.0	0.0	300.0	0.0	0.0	78.6	64.0
MAI	139.5	18.7	28.5	62.7	76.8	0.0	300.0	0.0	0.0	62.7	76.8
JUN	81.9	17.9	27.0	54.0	27.9	0.0	300.0	0.0	0.0	54.0	27.9
JUL	49.7	16.5	28.2	47.9	1.8	0.0	300.0	0.0	0.0	47.9	1.8
AGO	4.3	17.8	29.4	58.8	-54.5	54.5	250.0	50.0	4.5	54.3	0.0
SET	42.1	20.4	30.0	81.0	-38.9	15.6	284.0	34.0	4.9	76.1	0.0
Média	115.4	20.1	29.8	78.5	36.9	-	-	-	1.0	78.4	46.3
Total	1038.3	-	-	715.4	322.9	-	-	-	9.4	706.0	416.3

