



ANÁLISE DAS RELAÇÕES ENTRE PARAMETROS GEOELÉTRICOS E VAZÕES PARA O AQUIFERO LIVRE DE CAÇAPAVA DO SUL (RS)

ANALYSIS OF THE RELATIONSHIPS BETWEEN GEOELECTRICAL PARAMETERS AND FLOW FOR FREE AQUIFER OF CAÇAPAVA DO SUL (RS)

Cesar Augusto Moreira¹, Mara Lia Dias Cavalheiro², Alice Marques Pereira³, Diego Souza Sardinha⁴

Artigo recebido em: 11/09/2013 e aceito para publicação em: 06/11/2013.

Abstract: The geophysical methods may be employed in aquifer system studies, as determination of groundwater level, soil/rock contact, beyond estimative of the aquifer thickness horizon. The geoelectric methods are particularly relevant in evaluations of the oilfields systems, due to direct relations between porosity and electrical resistivity, which allow inferences about oil and gas production. The indirect estimative of the productions in free aquifers system is something complex before of the diverse variables responsible for factors or physical phenomena, as clays minerals, which conditioned the physical parameters by electric geophysical methods. This paper present analyzed correlation among electrical resistivity, chargeability and direct measure flow in shallow wells, for determination of statistical relationships between parameters and evaluation of the geological constraints evolved. The study count with the 23 shallow wells located in free aquifer, constituted by alteration materials of the granites localized in Caçapava do Sul (RS). The geophysical data are acquired by vertical electric sounding in Schlumberger array. The correlations between electrical resistivity and flow, chargeability and flow, thickness of the soil/saprolite and flow indicated relationships between physical and hydrogeologic parameters, with variations conditioned by factors as porosity, permeability, besides intrinsic geological heterogeneities such soil variable thickness and rock fragments with several alteration degrees.

Keywords: Geophysical. Free Aquifer. Statistical. DC Resistivity. Induced Polarization. Caçapava do Sul.

Resumo: Os métodos geofísicos podem ser empregados em estudos de sistemas aquíferos, como determinação da profundidade do nível aquífero, contato solo/rocha, além da estimativa de espessura de horizontes aquíferos. Os métodos geoelétricos são particularmente relevantes na avaliação de campos petrolíferos, devido a relações diretas entre porosidade e resistividade elétrica, que permitem inferências acerca da produção de óleo e gás. A estimativa indireta de produção em sistemas aquíferos rasos é algo complexo diante de diversas variáveis responsáveis por fatores ou fenômenos físicos, como presença de argilominerais, que condicionam os parâmetros físicos medidos por métodos geofísicos elétricos. Este trabalho analisa correlações entre resistividade, cargabilidade e medidas diretas de vazão em poços rasos, para determinação de relações estatísticas entre parâmetros e avaliação dos condicionantes geológicos envolvidos. O estudo contou com 23 poços rasos localizados num aquífero livre constituído por manto de alteração de granitos localizados no município de Caçapava do Sul (RS). Os dados geofísicos foram adquiridos por meio da técnica de sondagem elétrica vertical em arranjo Schlumberger. As correlações entre vazão e resistividade, vazão e cargabilidade, espessura da camada de solo/saprolite e vazão indicam relações entre propriedades físicas e hidrogeológicas, com variações entre os parâmetros condicionadas a fatores como porosidade, permeabilidade, além de heterogeneidades geológicas intrínsecas como espessura variável do solo e fragmentos de rocha com diversos graus de alteração.

Palavras-chave: Geofísica. Aquífero Livre. Estatística. Eletrorresistividade. Polarização Induzida. Caçapava do Sul - RS.

¹ Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus de Rio Claro - SP (moreirac@rc.unesp.br).

² Programa de Pós-graduação em Geociências (PPG). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS (maraliacavalheiro@gmail.com).

³ Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - UNESP Campus de Rio Claro - SP (alicemp2009@gmail.com).

⁴ Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL) - Campus Avançado de Poços de Caldas - MG (diegosouzasardinha@gmail.com).

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

A captação de água em aquíferos rasos é um procedimento bastante comum para atendimento a demandas de abastecimento de população de baixa renda, em áreas desprovidas de sistemas públicos ou particulares de abastecimento de água (GONÇALVES e GIAMPÁ, 2006).

Uma das principais causas de contaminação de aquíferos livre são produtos ou processos resultantes de atividades antropogênicas. Produtos de uso intensivo como fertilizantes e defensivos agrícolas são considerados de alto risco a contaminação de águas subterrâneas (FOSTER et al., 1987).

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

Neste sentido, estudos voltados ao entendimento de sistemas aquíferos, principalmente quanto a fatores relativos à recarga, armazenamento, transmissividade, vulnerabilidade e definição de áreas favoráveis a perfuração de poços produtores ou preservação, são fundamentais para disponibilidade deste importante recurso às futuras gerações (HANSEN et al., 2010).

Ferramentas geofísicas são potencialmente importantes em estudos voltados a compreensão da dinâmica de sistemas aquíferos, diante da sensibilidade de parâmetros físicos como resistividade elétrica e cargabilidade e suas relações com propriedades hidráulicas.

A possibilidade de medidas da variação de parâmetros físicos de forma indireta e multi-pontual, influenciadas por condicionantes hidro-

geológicos como a variabilidade no tipo de fluido intraporo (ar, água), composição química do fluido (conteúdo de sais dissolvidos), constituintes minerais (quartzo, minerais metálicos), granulometria predominante (argila, silte, areia), dentre outros, permite o desenvolvimento de estudos de relação com parâmetros hidráulicos diretos (KOSINSKI e KELLY, 1981; MAZAC et al., 1985; SALEM, 2001; SHEVNIN et al., 2006; BRAGA et al., 2006; SOUPIOS et al., 2007; BRAGA, 2008; PEINADO-GUEVARA et al., 2010; OKORO et al., 2010; EZEH et al., 2013).

Este trabalho apresenta e discute os resultados de estudos hidrogeológicos num aquífero livre em solo proveniente da alteração de granitos, por meio de medidas diretas de vazão em poços rasos e medidas indiretas de resistividade elétrica e cargabilidade, com o objetivo de determinar eventuais relações estatísticas entre parâmetros e avaliar os fatores que contribuem para a variabilidade dos dados geofísicos.

CONTEXTO GEOLÓGICO

A área de estudos está localizada no município de Caçapava do Sul na região centro-sul do estado do Rio Grande do Sul (Figura 1), distante mais de 260 km da capital. O município pode ser acessado pelas rodovias BR-153 (Bagé – Caçapava do Sul), BR-290 (Porto Alegre – Caçapava do Sul), BR-392 (Pelotas - Caçapava do Sul) e RS-011 (Lavras do Sul – Caçapava do Sul).

Esta área integra parte da Suíte Granítica Caçapava do Sul, classificado como granitóides sintranscorrentes contidos no Domínio Ocidental do Escudo Sul-Rio-Grandense (CPRM, 2000). Os granitóides Sintranscorrentes são representados por corpos plutônicos intrusivos nas unidades metamórficas do Domínio Ocidental, com foliação milonítica relacionada a eventos transcorrentes.

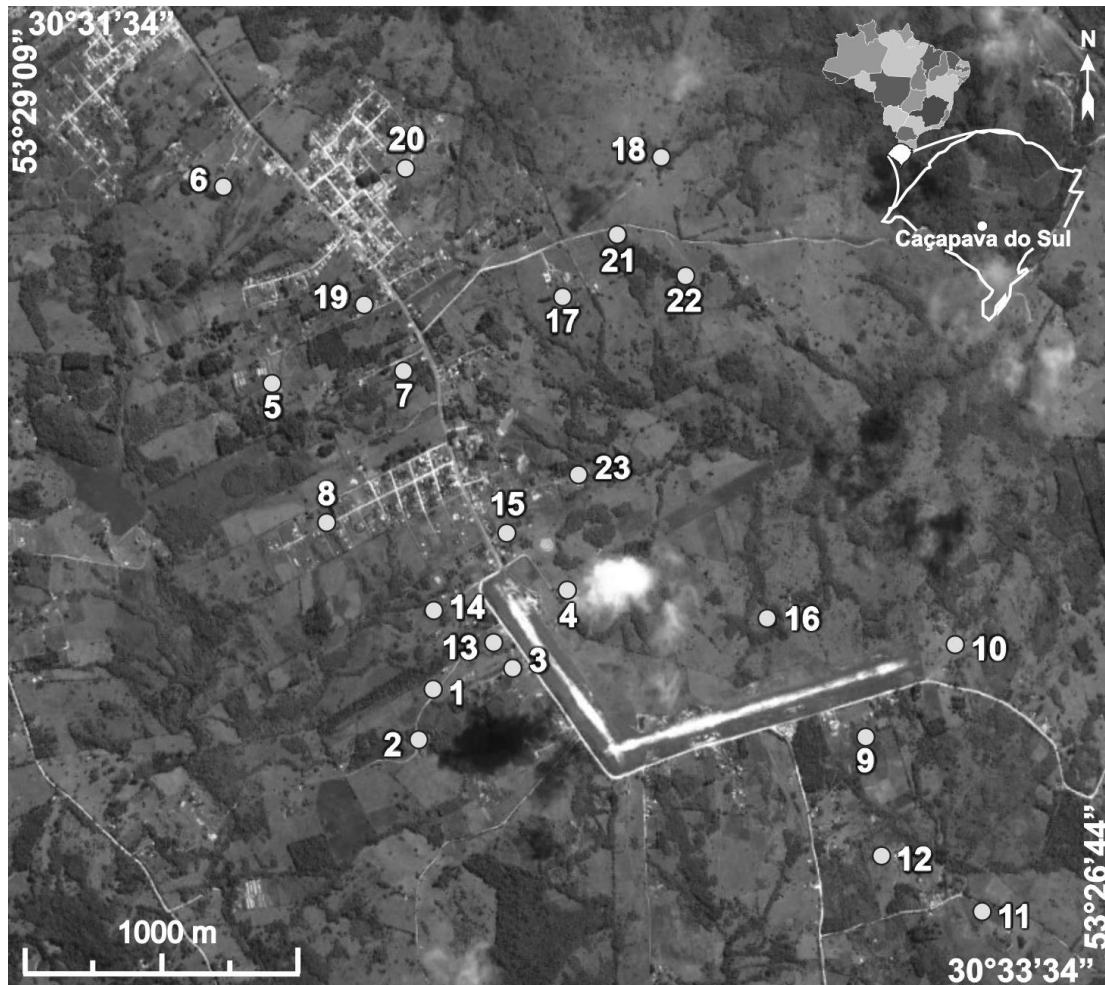


Figura 1 - Área de estudos, com detalhe para a localização dos pontos de coleta de dados
Figure 1 – Study area, with detail for locations of data collection

A Suíte Granítica Caçapava do Sul compreende dois corpos graníticos intrusivos na associação metassedimentar do Complexo Metamórfico Vacacaí. As relações de contato das rochas graníticas com as encaixantes são marcadas pela emissão de apófises, geralmente concordantes ou de baixo ângulo com a foliação principal dos metamorfitos. A foliação milonítica que afeta os granitóides é de maneira geral concordante com a foliação principal da seqüência metamórfica.

Esta suíte é constituída predominantemente por monzo e sienogranitos, com participação subordinada de rochas de composição granodiorítica a tonalítica presentes na borda oeste do corpo principal. Devido aos diversos tipos petrográficos, existem três fácies principais: biotita granitos, leucogranitos e granitos transicionais (CPRM, 2000).

A constituição mineralógica principal está representada por proporções variadas de quartzo, feldspato alcalino e plagioclásio, com biotita presente nas diversas fácies como mineral varietal e hornblenda identificada apenas nos tipos tonalíticos. Os minerais acessórios mais comuns estão

representados por zircão, allanita, apatita e minerais opacos, além de titanita e rutilo como acessórios. Clorita, epidoto, muscovita, carbonato e opacos secundários constituem a mineralogia resultante do metamorfismo associado à fase de deformação transcorrente (CPRM, 2000).

Os solos correspondentes a área da suíte granítica são classificados em duas unidades: podzólico vermelho-amarelo eutrófico e podzólico vermelho-amarelo distrófico (IBGE, 2002).

Solos eutróficos dessa região apresentam as seguintes características: Tb A proeminente e moderado, textura média cascalhenta/argilosa cascalhenta e média cascalhenta/argilosa, podzóico bruno-acizentado distrófico e eutrófico, Tb A moderado, textura média cascalhenta/argilosa e solos litólicos distróficos e eutróficos, A proeminente e moderado, textura média cascalhenta, substrato migmatito, relevo ondulado e forte ondulado. E solos litológicos distróficos A moderado, textura média cascalhenta, substrato migmatito, relevo ondulado e afloramento de rocha (IBGE, 2002).

O perfil de alteração baseado em descrições de campo é constituído por solo argiloso, sotoposto por saprolito com fragmentos com tamanhos variáveis de granito parcialmente alterado, sobre rocha granítica inalterada. Os indícios de campo apontam para um perfil de alteração *in situ*, ausente de quaisquer evidências de solo transportado. Os horizontes pedológicos da área de estudos selecionados para o presente trabalho estão posicionados, em sua maioria, nas cotas mais elevadas da região estudada, caracterizada por um relevo extenso e pouco ondulado, com perfil de alteração espesso e desenvolvido.

Este perfil de alteração está susceptível a pressões atmosféricas e infiltração de águas meteoricas que percolam o solo permeável até o contato solo/rocha, que por sua vez define uma superfície altamente impermeável, exceto por fluxo em fraturas em pontos localizados.

MATERIAIS E MÉTODOS

O método da Eletrorresistividade é baseado na geração de um campo elétrico em subsuperfície por injeção de corrente elétrica (I) por meio de um dispositivo, representado por hastes metálicas, denominado circuito transmissor (KEAREY et al., 2002). O potencial elétrico (ΔV) produzido pela passagem deste campo e captado por meio de um circuito receptor, que também pode ser representado por hastes metálicas ou eletrodos impolarizáveis. Os circuitos de transmissão e recepção são posicionados em superfície, segundo um arranjo geométrico pré-estabelecido.

A aplicação da Lei de Ohm que considera o espaçamento entre os eletrodos, representado por um fator denominado K, permite medidas do parâmetro resistividade aparente (ρ_a) para vários níveis de profundidade (Equação 1):

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad \Omega.m \quad (\text{Equação 1})$$

A resistividade elétrica é diretamente condicionada a fatores como porosidade, permeabilidade, grau de saturação, salinidade do fluido intraporo, conteúdo mineral, dentre outros (McNEILL, 1980).

O método de Polarização Induzida (IP) é baseado num fenômeno de estímulo de corrente elétrica, observado após o retardo ou atraso de um sinal de voltagem em materiais de subsuperfície (SUMNER, 1976). Este método também consiste no emprego de um dispositivo eletródico de transmissão para injeção de corrente elétrica pulsante e periódica em subsuperfície, cuja resposta é

obtida por meio de um circuito receptor constituído de eletrodos impolarizáveis.

A curva de decaimento transiente representa um retorno ao estado original de repouso conseqüente do distúrbio devido à aplicação de uma corrente elétrica. Durante o tempo de aplicação dessa corrente, uma fração desta energia é armazenada em solos e rochas, resultante de variações da mobilidade de íons em meio poroso/fraturado ou da variação entre condutividade iônica e eletrônica em presença de minerais metálicos (TELFORD et al., 2004; KEAREY et al., 2002).

A polarização eletrolítica ou de membrana representa o principal mecanismo responsável pela polarizabilidade de meios porosos ausentes de minerais metálicos. Consiste num processo de acumulação de íons, seja em pontos de estrangulamento em caminhos de fluxo eletrolítico ou por influência de argilominerais eletricamente carregados (KELLER & FRISCHNECHT, 1966; TELFORD et al., 2004).

Alterações na mobilidade do eletrólito, representado pela água num sistema aquífero, pode resultar no acúmulo de cargas elétricas artificialmente estimuladas. Muitas das moléculas de água que fluem em poros e capilares interagem com suas paredes, onde a velocidade de fluxo é bastante reduzida. Em caminhos bastante estreitos, o aumento da viscosidade resulta no decréscimo da velocidade de fluxo no intervalo, processo que resulta no acúmulo de ânions em uma extremidade do canal e de cátions na outra extremidade (KELLER & FRISCHNECHT, 1966). A passagem de corrente elétrica neste contexto resulta no acúmulo de cargas com sinal oposto separado pela zona de estrangulamento e geração de uma diferença de potencial.

Outro mecanismo que afeta a velocidade do fluxo de íons sem impedir sua mobilidade é a presença de fragmentos de rocha ou partículas minerais distribuídas ao longo dos poros, que apresentem capacidade de troca catiônica. Este fenômeno é característico de argilominerais, constituídos de camadas alternadas de anions e camadas passíveis de retenção ou troca de cátions em solução (KELLER & FRISCHNECHT, 1966). Neste contexto, o transito de campo elétrico artificialmente gerado pode estimular a atração de íons de cargas opostas nas fases de argilominerais, cujo retorno ao estado natural pode ser medido em termos de potencial elétrico transiente.

Os parâmetros de medidas de polarização induzida no domínio do tempo são determinados pela característica da forma da curva do potencial transiente, que podem ser a percentagem de pola-

rização induzida, integral tempo-transiente e cargabilidade (TELFORD et al., 2004). A cargabilidade é definida pelo potencial transiente variável (V_i) entre dois pontos da curva de decaimento transiente (t_1 e t_2), normalizada pelo potencial primário (V_c), definido como (Equação 2):

$$M = \frac{1}{V_c} \int_{t_2}^{t_1} V_i dt \quad (\text{Equação 2})$$

O procedimento adotado neste trabalho consistiu inicialmente na localização de 23 poços rasos no município de Caçapava do Sul (RS), em diferentes cotas topográficas, por meio de diversas visitas de campo, solicitação de acesso à área e georreferenciamento dos poços (Figura 1).

A etapa seguinte consistiu na aquisição de dados geofísicos, geológicos e hidrogeológicos para cada poço selecionado. A aquisição de dados geofísicos envolveu a aplicação dos métodos da Eletrorresistividade e da Polarização Induzida, por meio da técnica de sondagem elétrica vertical em arranjo Schlumberger, com leitura dos parâmetros físicos resistividade elétrica em $\Omega.m$ e cargabilidade em mV/V.

Foi utilizado resistímetro Syscal Pro (IRIS Instruments – França), constituído por uma unidade transmissora e uma unidade receptora, configuradas para realizar medidas simultâneas de resistividade e cargabilidade no domínio do tempo. Após alguns testes preliminares de campo, foram estabelecidos os seguintes parâmetros de aquisição: 200 V de tensão, tempo de leitura de 1000ms, janela única de 80 ms.

O ponto central de cada ensaio geofísico foi posicionado à montante do poço segundo a topografia do local, com abertura do arranjo em direção perpendicular ao declive topográfico. O arranjo consistiu na abertura máxima de 25 m para eletrodos de corrente para cada lado a partir do centro, com movimentação e leitura a cada metro e eletrodos de potencial posicionados a 0,3 m e 2,0 m também a partir do centro do arranjo.

Foram utilizados eletrodos não polarizáveis à base de solução de sulfato de cobre supersaturada (Cu-CuSO₄) para a leitura dos parâmetros, caracterizados por um fio de cobre em seu interior e base porosa, que permite o trânsito da solução e percolação no solo. Este procedimento reduz a resistência de contato e minimiza a geração de correntes parasíticas geradas pelo uso de eletrodos metálicos para leituras.

Foram realizadas medidas de cota do nível freático e ensaios de vazão concomitante a aquisição dos dados geofísicos.

Os poços selecionados neste trabalho são escavações realizadas por meio de ferramentas manuais e abertos de forma circular, com 1,5 m de diâmetro e base assentada em intervalos saprolíticos ricos em fragmentos de rocha, devido às limitações de escavabilidade manual destes materiais, revestidos no intervalo de solo seco por tubos de concreto.

A determinação da vazão utilizou procedimento simplificado, que consistiu na extração de água por ação gravitacional com fluxo estrangulado até o estabelecimento de nível freático estático. Desta forma, toda água captada do aquífero para o poço era drenada por gravidade, e quantificada pelo método volumétrico. Este método é recomendado para pequenas vazões, como no caso encontrado para a área de estudos, onde foi realizada medição direta do tempo necessário para enchimento de recipiente com volume conhecido, conforme proposto em Daker (1983) e adotado no trabalho de Silva et al. (2011). Foram realizadas três medidas consecutivas e adotado o valor médio.

Os dados geofísicos foram processados no programa IX1D (Interpex- Estados Unidos). Fundamentado em critérios pré-determinados verificados em campo, o processamento das sondagens foi baseado em um modelo de quatro camadas, de forma concomitante para os parâmetros resistividade elétrica e cargabilidade. Foram obtidos níveis geoeletricos e seus respectivos valores de resistividade e cargabilidade, além da espessura de cada camada e o erro médio quadrático (RMS) de ajuste entre a curva de campo e curva teórica do programa.

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

As descrições de campo referentes ao perfil de alteração revelam a existência de solo seco, solo saturado (nível aquífero), intervalo saprolítico e rocha inalterada (Figura 2). Este modelo simplificado de aquífero livre foi adotado como base para o processamento dos dados geofísicos. Foram definidos modelos de quatro níveis ou camadas geoeletricas teóricas para ajuste nas curvas de campo (Tabela 1).

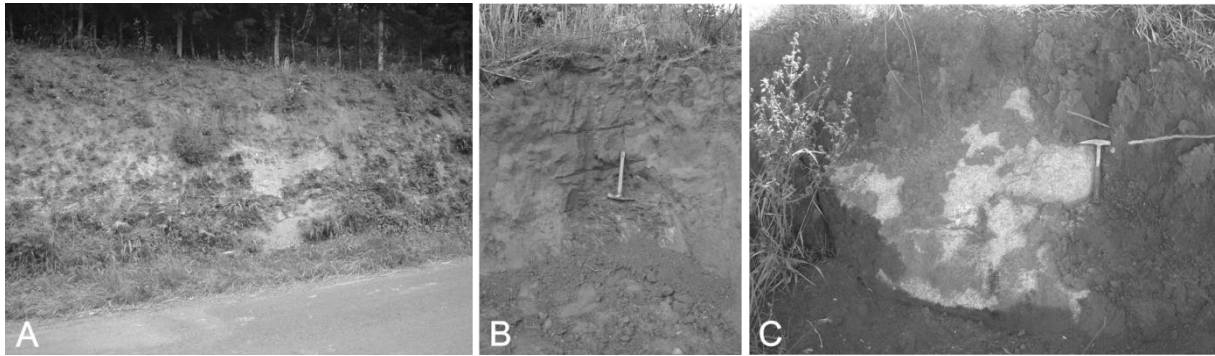


Figura 2 – Horizontes de solo da área de estudos. A) Vista de horizonte de solo seco. B) Fragmento de rocha alterada. C) Fragmento de rocha inalterada em horizonte saprolítico

Figure 2 – Soils horizons in study area. A) View of the dry soil horizon. B) Fragment of the altered rock C) Fragment of the unchanged rock in saprolitic horizon

Tabela 1 – Valores máximos e mínimos de resistividade elétrica e cargabilidade por horizonte geoeétrico

Table 1 – Maximum and minimum values of the electrical resistivity and chargeability for geoelectric horizon

Nível geoeétrico	Resistividade Elétrica ($\Omega.m$)	Cargabilidade (mV/V)
1°	6497,0 – 741,5	13,09 – 1,97
2°	3796,6 – 1129,0	8,10 – 5,30
3°	9000,9 – 1430,1	34,49 – 0,55
4°	61010,0 – 516,4	28,50 – 0,69

Este ajuste resultou num produto gráfico constituído por curva de campo, modelo geoeétrico e erro médio quadrático (RMS). Devido ao processamento conjunto dos dados de resistivida-

de elétrica e cargabilidade, este produto gráfico apresenta ambas as curvas, com a adição do valor de cada nível geoeétrico (Figuras 3 a 6).

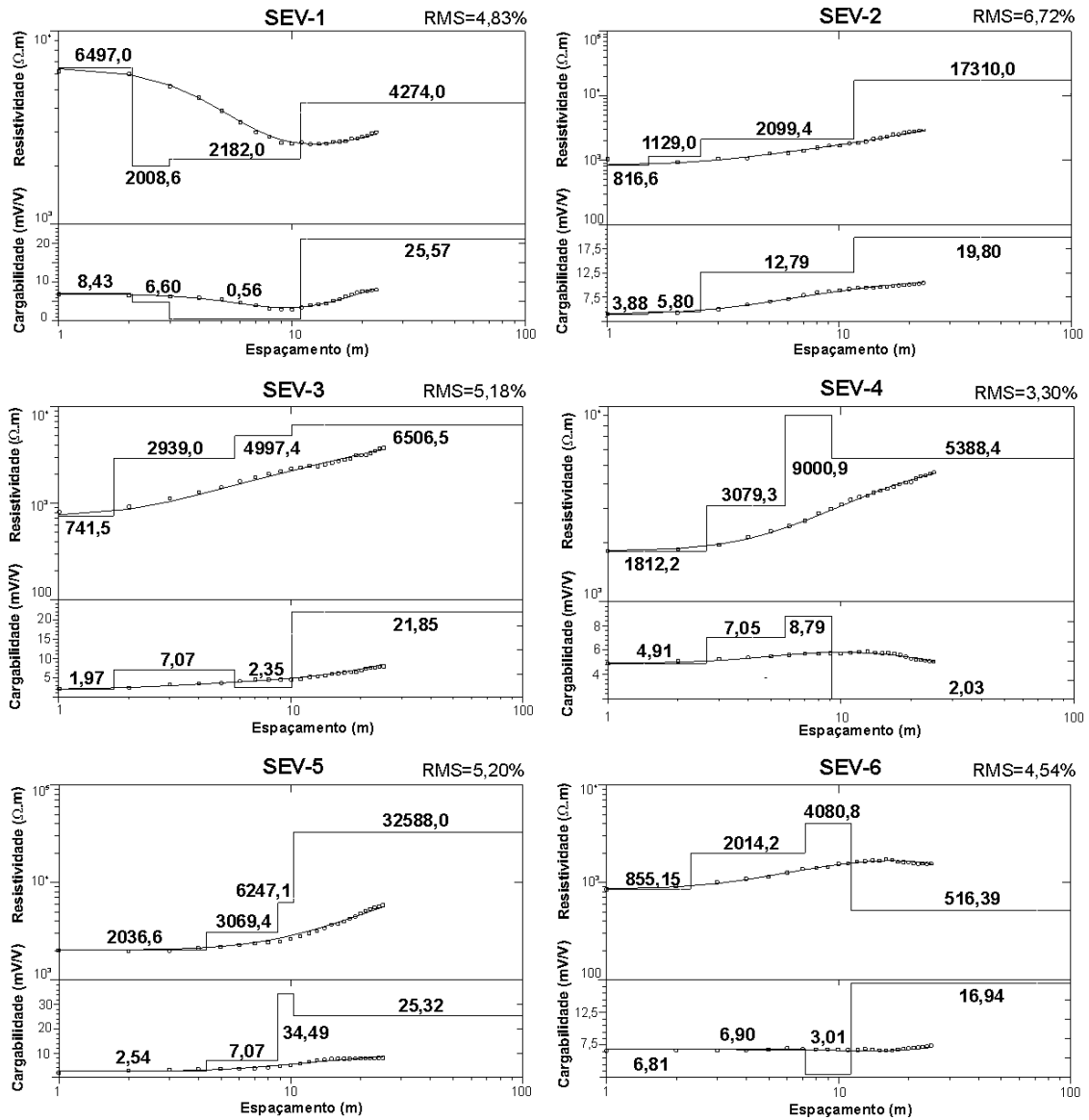


Figura 3 - Sondagens elétricas verticais 1 a 6, com curva de campo, modelo geoeletrico e valores de resistividade e cargabilidade derivados do processamento para cada nível geoeletrico

Figure 3 - Vertical electrical soundings 1-6 with curve field and geoelectrical model resistivity and chargeability derived from processing for each level geoelectrical

Uma análise preliminar dos resultados indica um ajuste entre dados de campo e curva teórica com erro médio quadrático baixo, situado em sua maioria entre 2% e 5%. Alguns testes preli-

minares, como o processamento em modelos de três camadas, resultaram em erros substancialmente maiores e ajustes insatisfatórios.

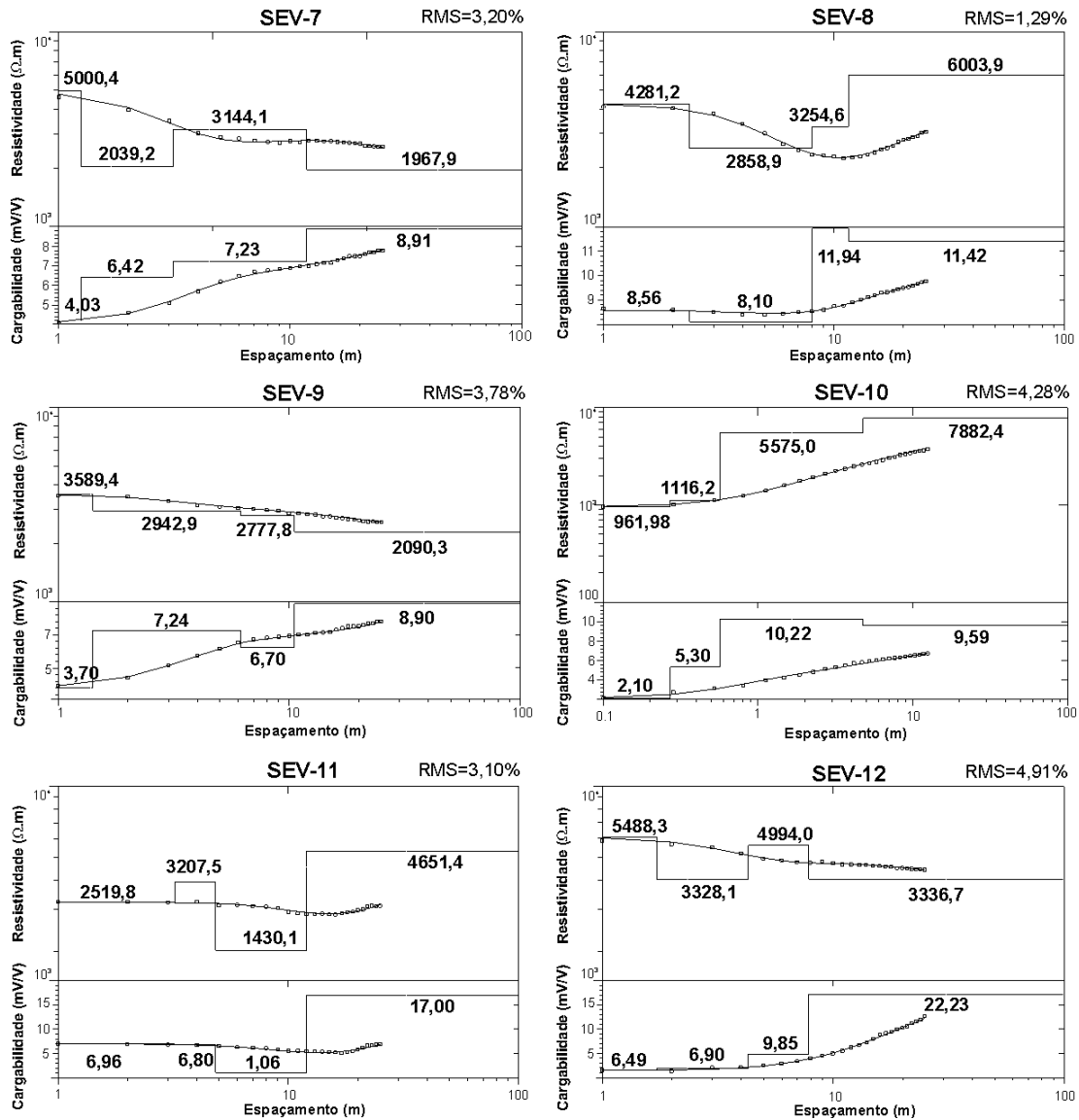


Figura 4 - Sondagens elétricas verticais 7 a 12, com curva de campo, modelo geoeletrico e valores de resistividade e cargabilidade derivados do processamento para cada nível geoeletrico

Figure 4 - Vertical electrical sounding 7-12, with curved field, and geoelectrical model resistivity and chargeability derived from processing for each level geoelectrical

Em contrapartida, a adoção de modelos de quatro camadas permitiu além de um ajuste adequado dos dados, valores pós-processados de resistividade e cargabilidade aparentemente consistentes e representativos dos condicionantes geológicos presentes na área, como elevado conteúdo de argilominerais e a presença de blocos de

granito de dimensões variadas e parcialmente alterados no horizonte saprolítico. Esta consistência em termos de qualidade entre aquisição e processamento resulta em gráficos de correlação entre parâmetros, com elevado coeficiente de correlação (Figuras 5 a 7).

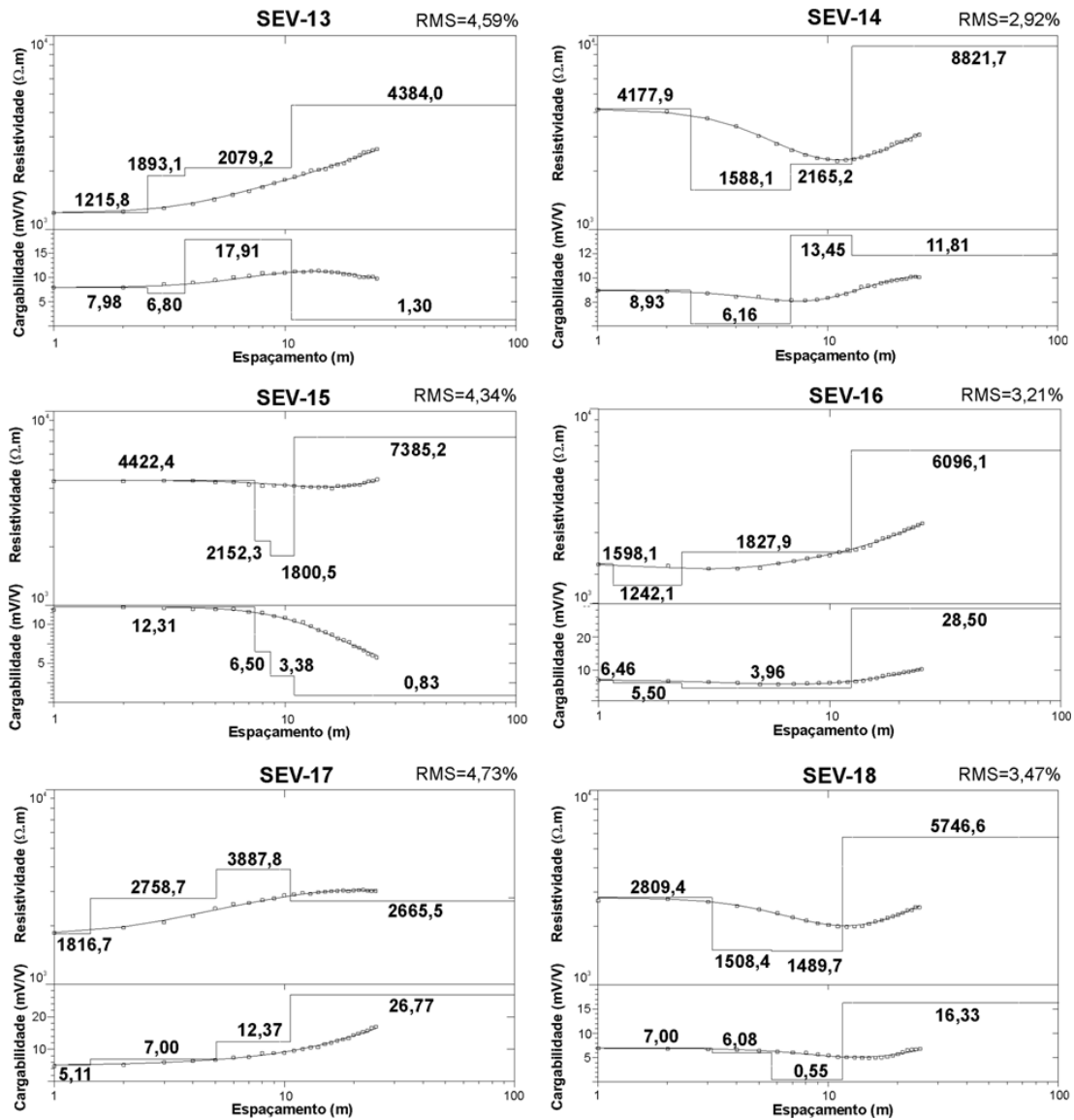


Figura 5 - Sondagens elétricas verticais 13 a 18, com curva de campo, modelo geoeétrico e valores de resistividade e cargabilidade derivados do processamento para cada nível geoeétrico

Figure 5 - Vertical electrical sounding 13-18, with curved field, and geoelectrical model resistivity and chargeability derived from processing for each level geoelectrical

Os parâmetros resistividade elétrica, cargabilidade e vazão referentes ao segundo nível geoeétrico, representativo da zona saturada, foram tabelados e plotados em diagramas de dispersão bidimensionais. Esta forma de apresentação

foi escolhida com o objetivo de tornar visível eventuais relações entre os parâmetros envolvidos, bem como seus respectivos graus de relação a partir do ajuste de linhas de tendência e coeficientes de determinação.

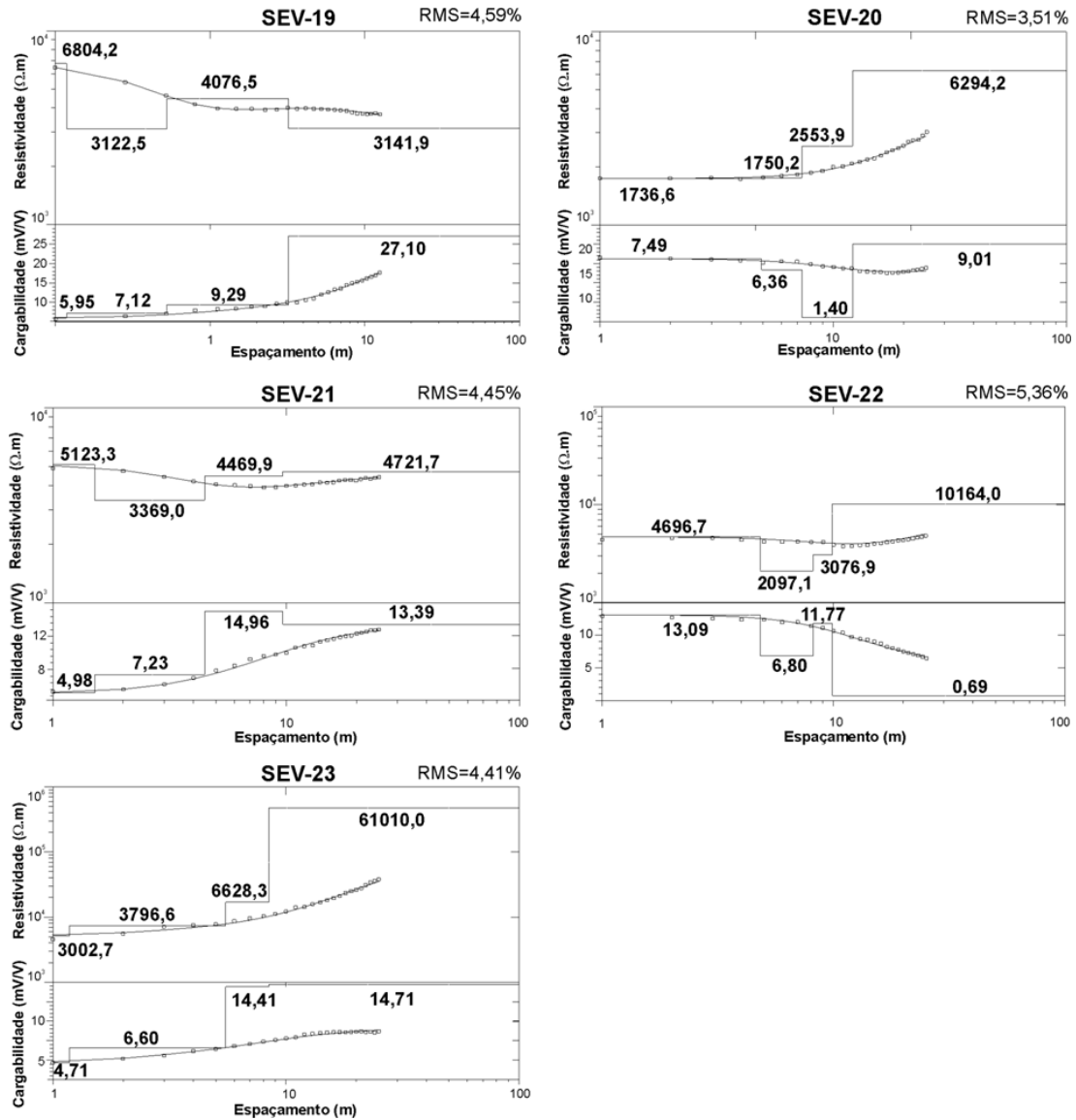


Figura 6 - Sondagens elétricas verticais 19 a 23, com curva de campo, modelo geoeletrico e valores de resistividade e cargabilidade derivados do processamento para cada nível geoeletrico

Figure 6 - Vertical electrical sounding 19-23, with curved field, and geoelectrical model resistivity and chargeability derived from processing for each level geoelectrical

Foram constituídas as seguintes relações: resistividade *versus* vazão, cargabilidade *versus* vazão e espessura da camada de solo/saprolito *versus* vazão. Para cada gráfico foi atribuída linha de tendência, equação de reta e coeficiente de determinação R^2 correspondente.

Este coeficiente mede a proporção da variação do parâmetro do eixo y, que pode ser explicada pela variação do eixo x, variável entre 0 a 1, estimado a partir de todos os dados disponíveis para cada gráfico. Para os três casos foi possível o

ajuste de equações de reta que resultam em elevados coeficientes de correlação (Figuras 7 e 8).

No gráfico cargabilidade *versus* vazão foi realizado um ajuste polinomial de grau 2 com coeficiente de determinação $R^2=0,906$. A linha de tendência apresenta uma ascendência constante entre os valores plotados até 0,012L/s, quando ocorre inflexão da linha e queda nos valores de cargabilidade com aumento da vazão. Esta inflexão coincide com um valor de cargabilidade de 7mV/V (Figura 7).

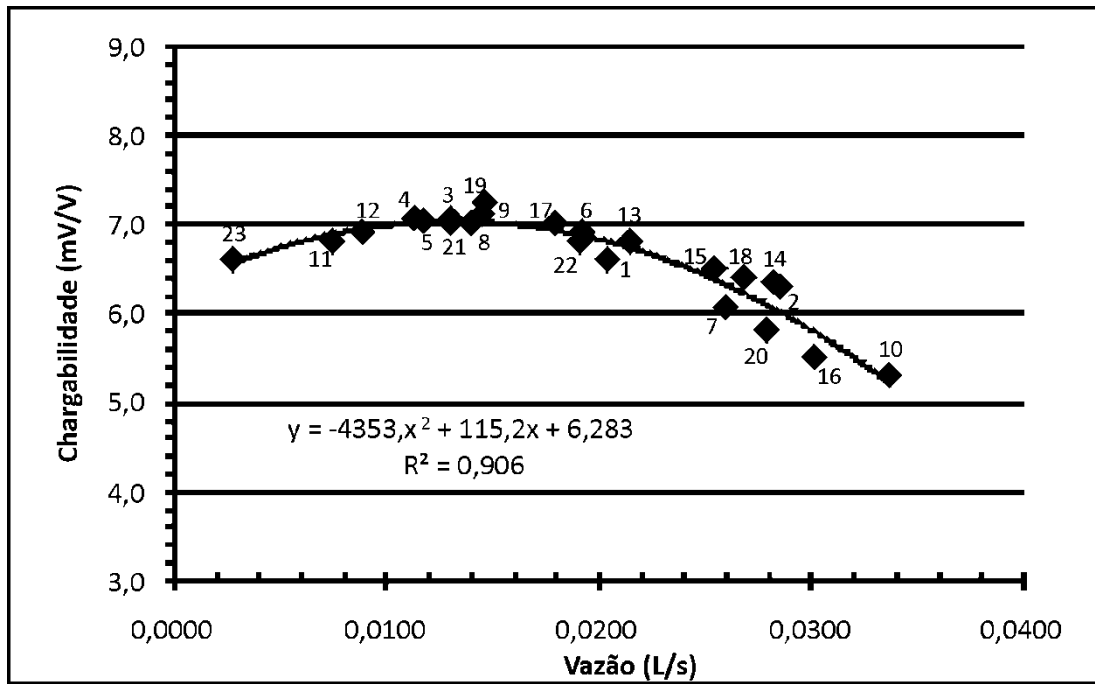


Figura 7 - Vazão *versus* cargabilidade, com linha de tendência, equação da reta, coeficiente de determinação R^2 e numeração dos símbolos referentes aos poços em mapa

Figure 7 - Flow *versus* chargeability, with trend line equation of the line, coefficient of determination R^2 and numbering of symbols referring to wells map

A faixa de valores entre 0,002 L/s e 0,012 L/s é representada pelo aumento gradual da cargabilidade e aumento constante da vazão. Contudo, a partir de 0,012 L/s ocorre uma queda também gradual nos valores de cargabilidade com o aumento da vazão.

Este padrão pode ser compreendido sob a ótica dos fenômenos relativos à geração de polarização. No caso em questão, o fenômeno de polarização eletrolítica é responsável pela geração de potencial elétrico residual. Aparentemente, a mobilidade iônica restrita mais crescente em áreas com vazão entre 0,002 L/s e 0,012 L/s proporciona o aumento nos valores de cargabilidade. Há uma coincidência entre os maiores valores de vazão desta faixa com o maior valor de cargabilidade obtido para toda a área.

Maiores vazões nos poços são representa-

tivos de áreas com porosidade/permeabilidade relativamente maiores, onde a condutividade hidráulica e iônica no aquífero são cada vez maiores. Nestes casos, aumento na mobilidade iônica aparentemente compromete a geração de pontos de acumulação de potencial elétrico, a partir de um determinado grau de porosidade e permeabilidade intrínseca.

No gráfico de resistividade *versus* vazão foi realizado um ajuste linear de grau 1 com coeficiente de determinação $R^2=0,900$. A linha de tendência indica uma relação inversa, ou seja, queda na resistividade concomitante ao aumento da vazão (Figura 8). A tendência de aumento da resistividade concomitante a queda nos valores de vazão pode estar relacionada ao grau de desenvolvimento de solo/saprolito.

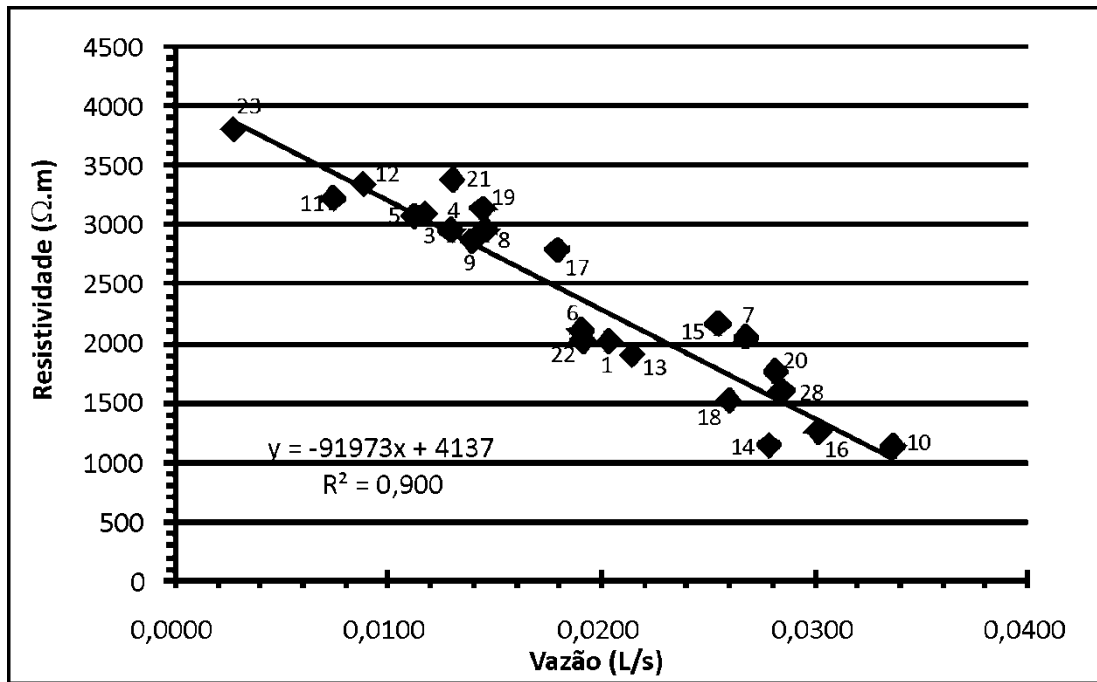


Figura 8 - Vazão *versus* resistividade, com linha de tendência, equação da reta, coeficiente de determinação R^2 e numeração dos símbolos referentes aos poços em mapa.

Figure 8 - Flow *versus* resistivity with trend line equation of the line, coefficient of determination R^2 and numbering of symbols referring to wells map

A espessura da camada de solo/saprolito pode ser indicativa do grau de evolução pedogenética, ou seja, maiores espessuras indicam perfis mais alterados e com quantidades relativamente menores de fragmentos de rocha. Em contrapartida, solos pouco espessos são caracterizados por quantidades relativamente maiores de fragmentos

de rocha e teor de argilominerais (VELDE & MEUNIER, 2008).

No gráfico de espessura da camada de solo + saprolito *versus* vazão foi realizado um ajuste linear de grau 1 com coeficiente de determinação $R^2=0,902$ (Figura 9).

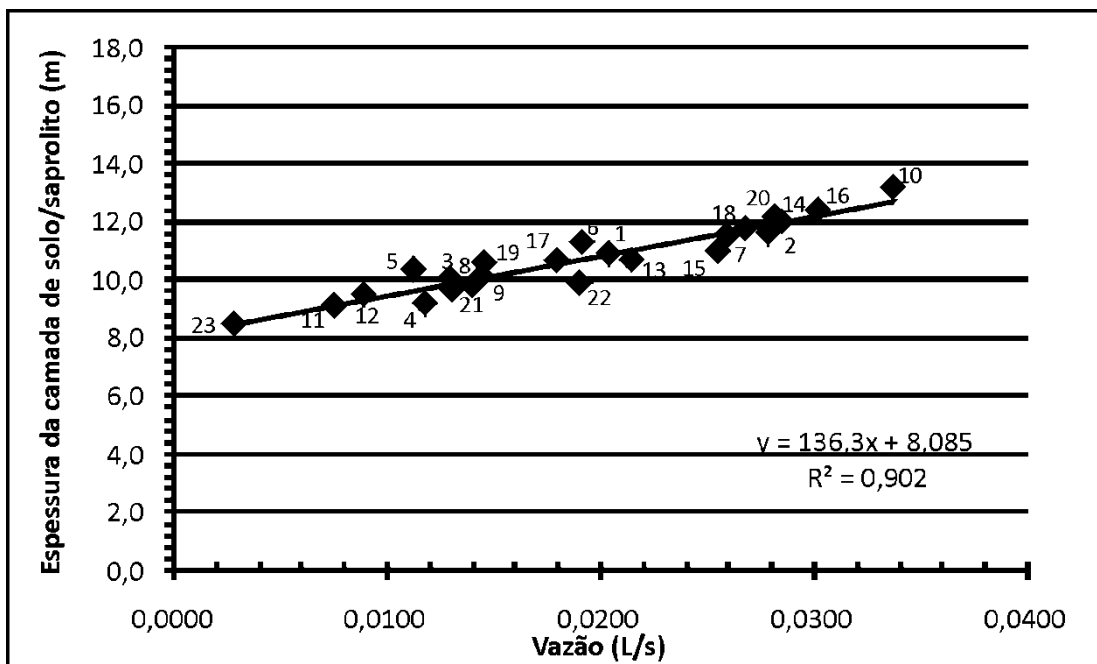


Figura 9 - Espessura da camada de solo/saprolito *versus* vazão, com linha de tendência, equação da reta, coeficiente de determinação R^2 e numeração dos símbolos referentes aos poços em mapa

Figure 9 - Thickness of the soil / saprolite *versus* flow, with trend line equation of the line, coefficient of determination R^2 and numbering of symbols referring to wells map

Neste sentido, além de indicativo em termos evolutivos, a espessura de solo/saprolito é diretamente proporcional a vazão. Neste caso, perfis relativamente evoluídos apresentam maior espessura de camada aquífera e menor quantidade de fragmentos de rocha. Portanto, ambos os fatores contribuem para correlação entre resistividade elétrica e vazão.

CONCLUSÕES

O contexto geológico local é caracterizado por solos de alteração de rocha granítica, com evolução pedogenética localmente variável, embora em condições de relevo relativamente plano e com vertentes relativamente pouco desenvolvidas. Contudo, os dados revelam locais com perfil de solo profundo e com pequena quantidade de fragmentos de rocha no horizonte aquífero, em contraste com locais de solo pouco desenvolvido e predomínio de fragmentos de rocha no horizonte aquífero. Esta característica exerce grande influência nos parâmetros geofísicos e hidrogeológicos.

Horizontes aquíferos pouco espessos foram caracterizados por elevada resistividade e baixa vazão, possivelmente devido ao predomínio de fragmentos de rocha, enquanto que horizontes aquíferos relativamente espessos foram caracterizados por baixa resistividade e elevada vazão, fatores atribuídos ao predomínio de materiais porosos e permeáveis.

Os resultados permitiram definir relações entre a vazão medida diretamente em poços rasos, com os parâmetros físicos resistividade elétrica e cargabilidade. O processamento das sondagens elétricas de forma conjunta, ou seja, inversão concomitante dos parâmetros resistividade e cargabilidade para cada sondagem produziu resultados satisfatórios, com erro médio quadrático (RMS) baixo e variável entre 2,92% a 6,72%. Os parâmetros relacionados nos gráficos de dispersão permitiram o ajuste de linhas de tendência e coeficiente de determinação (R^2) elevados e satisfatórios.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), campus Caçapava do Sul, pelo acesso ao equipamento utilizado, aos proprietários dos poços pelo acesso e hospitalidade, além do apoio financeiro da Fundação de Amparo a Pesquisa do Rio Grande do Sul (FAPERGS) pela bolsa de pesquisa cedida à aluna Mara Lia Dias Cavalheiro.

A análise individual interpretativa das relações entre parâmetros revelou variações condicionadas a fatores como teor de argila, porosidade, permeabilidade, além de heterogeneidades intrínsecas ao ambiente estudado, como espessura de solo bastante variável e presença de fragmentos de rocha com diversos graus de alteração, este último previamente identificado em campo.

O aumento da cargabilidade concomitante ao aumento da vazão até certo ponto pode estar associada ao fenômeno de polarização eletrolítica. Áreas com vazões acima de 0,012L/s são caracterizadas por valores relativamente baixos de cargabilidade, algo possivelmente condicionado ao aumento da transmissividade hidráulica e redução na quantidade de áreas de estrangulamento, fundamentais para surgimento do fenômeno de potencial eletrolítico. Contudo, tais possibilidades são passíveis de verificação em estudos de detalhe, por meio de amostragem de solo e rocha e medidas em laboratório.

A relação inversamente proporcional entre resistividade elétrica e vazão resulta num dado relevante para estudos hidrogeológicos, principalmente devido ao elevado coeficiente de correlação e versatilidade do método geofísico. A metodologia adotada neste trabalho, embora essencialmente estatística, comprova que calibrações preliminares de sondagens elétricas com dados diretos em poços, podem viabilizar estudos hidrogeológicos quantitativos por meio do uso intensivo de ferramentas geofísicas, principalmente em áreas com pequeno número de poços.

Neste sentido, além do uso convencional de métodos elétricos como ferramenta para definição de camadas em sistemas aquíferos, profundidade de nível freático, profundidade do contato solo/rocha, determinação de sentidos de fluxo, além de outros, tais métodos podem ser empregados, por exemplo, em estimativas de produção durante etapas de planejamento de perfuração e instalação de poços produtores, bem como em estudos de dispersão de poluentes em sistemas aquíferos.

REFERÊNCIAS

- BRAGA, A. C. O. Estimativa da vulnerabilidade natural de aquíferos: uma contribuição a partir da resistividade e condutância longitudinal. **Revista Brasileira de Geofísica**, n. 26, p. 61-68, 2008. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbg/v26n1/a05v26n1.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2013.
- BRAGA, A. C. O.; MALAGUTTI FILHO, W.; DOURADO, J. C. Resistivity (DC) method applied to aquifer protection studies. **Revista Brasileira de Geofísica**, n. 24, p. 573-581, 2006. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbg/v24n4/a10v24n4.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2013.
- CPRM - COMPANHIA DE PESQUISAS DE RECURSOS MINERAIS. Folha Cachoeira do Sul, RS. Escala 1:250.000. Brasília/DF, 2000.
- DAKER, A. **Captação, Elevação e Melhoramento da Água** – A água na Agricultura. Livraria Freitas Bastos. Rio de Janeiro n. 6, 2, p. 408, 1983.
- EZEH, C. C.; UGWU, G. Z.; OKONKWO, A.; OKAMKPA, J. Using the relationships between geoelectrical and hydrogeological parameters to assess aquifer productivity in Udi LGA, Enugu State, Nigeria. **International Research Journal of Geology and Mining**, n. 3: p. 9-18, 2013.
- FOSTER, S.; M. VENTURA, R.; HIRATA. **Groundwater pollution: an executive overview of the Latin America-Caribbean situation in relation to potable water-supply**. Ed. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS, OMS). Peru. Technical Report, p. 38, 1987
- GONÇALVES, V. G.; GIAMPÁ, C. E. Q. **Águas Subterrâneas e Poços Tubulares Profundos**. São Paulo, Signus Editora, p. 502, 2006.
- HANSEN, M. A. F.; LIMA, J. P. R.; FRIES, M.; MOREIRA, C. A. Importância da geofísica no estudo das águas. In: Adilson Ben da Costa. (Org.). **Água e Saúde**. Porto Alegre: UNISC, n.1, p. 200-230, 2010.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2002. **Mapa Exploratório de Solos do Rio Grande do Sul**. Rio de Janeiro/RJ: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em <http://geoftp.ibge.gov.br/mapas/tematicos/tematico_estadua/RS_solos.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2013.
- KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. **An Introduction to Geophysical Exploration**. Malden, Blackwell, p. 262, 2002.
- KELLER, G. V.; FRISCHKNECHT, F. C. **Electrical methods in geophysical prospecting**. Pergamon Press, New York, p.562, 1966.
- KOSINSKI, W. K.; KELLY, W. E. Geoelectric sounding for predicting aquifer properties. **Ground Water**, n.19, p. 163 – 171, 1981.
- MAZAC, O.; KELLY, W. E.; LANDA, I. A hydrogeophysical model for relations between electrical and hydraulic properties of aquifers. **Journal of Hydrology**, n. 79, p.1-19, 1985.
- McNEILL, J. **Electrical Conductivity of Soils and Rocks**. Technical Note TN 5, p. 21, 1980. Disponível em: <<http://www.geonics.com>>. Acesso em: 10 jun. 2013.
- NIWAS, S.; SINGHAL, D.C. Estimation of aquifer transmissivity from Dar Zarrouk parameters in porous media. **Journal of Hydrogeology**, n. 50, p. 393–399, 1981.
- OKORO, E. I.; EGBOKA, B. C. E.; ONWUEMESI, A. G. Evaluation of the aquifer characteristic of Nanka sands using hydrogeological method in combination with Vertical Electrical Sounding (VES). **Journal Applied Environmental Management**, n. 14, p. 5-9, 2010. Disponível em: <<http://www.ajol.info/index.php/jasem/article/viewFile/5782/2/46190>>. Acesso em: 10 jun. 2013.
- PEINADO-GUEVARA, H. J.; GREEN-RUIZ, C. R.; DELGADO-RODRIGUEZ, O.; HERRERA-BARRIENTOS, J.; BELMENDO-JIMÉNEZ, S.; TORREZ, M. A. L. G.; SHEVNIN, V. **Estimación de la conductividad hidráulica y contenido de finos a partir de leyes experimentales que relacionan parámetros hidráulicos y electricos**. Ra Zimhai, n. 6, p. 45-57, 2010. Disponível em: <<http://www.uaaim.edu.mx/webraximhai/Ej-18articulosPDF/14-CoductividadHidraulica.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2013.
- SAINATO, C. M.; LOSINNO, B. N.; GALINDO, G.; LANDINI, A. M.; FAZIO, A. M. Geofísica aplicada a la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación en zonas rurales de la provincia de Buenos Aires, Argentina. **Águas Subterrâneas**, n. 20, p. 71-82, 2006. Disponível em: <<http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/asubterraneas/article/view/11432/7957>>. Acesso em: 10 jun. 2013.
- SALEM, H. S. Modelling of Lithology and Hydraulic Conductivity of Shallow Sediments from Resistivity Measurements using Schlumberger Vertical Electric Soundings. **Energy Sources**, n. 23, p. 599-618, 2001.
- SHEVNIN, V.; DELGADO-RODRÍGUEZ, O.; MOUSATOV, A.; RYJOV, A. Estimation of Hydraulic Conductivity on Clay Content in Soil. **Geofísica Internacional**, n. 45, p. 195-207, 2006. Disponível em: <<http://www.scielo.org.mx/pdf/geoint/v45n3/v45n3a4.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2013.
- SOUPIOS, P. M.; KOULI, M.; VALLIANATOS, F.; VAFIDIS, A.; STAVROULAKIS, G. Estimation of Aquifer Hydraulic Parameters from Surficial Geophysical Methods: A Case Study of Keritis Basin in Chania (Crete – Greece). **Journal of Hydrology**, n. 338, p. 122-131, 2007. Disponível em: <http://soupon.chania.teicrete.gr/papers/Keritis_JH_2007.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2013.
- SILVA, T. C.; FILGUEIRA, H. J. A.; ALENCAR, R. I. S.; PEDROSA FILHO, L. A.; CAVALCANTI, A. K. **Avaliação quantitativa de captações de águas de nascentes na bacia do rio Gramame**. Anais do XIX ABRH - Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Maceió/AL. 2011.
- SUMNER, J. S. **Principles of induced polarization for geophysical exploration**. Amsterdam, Elsevier Scientific, p. 277, 1976.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. **Applied Geophysics**. New York, Cambridge University Press, n. 2, p.774, 2004.

VELDE, B.; MEUNIER, A. **The origin of clays minerals in soils and weathered rocks**. Berlin, Springer-Verlag, p.426, 2008.