

Estudo da dinâmica da água infiltrada com o auxílio de método geofísico - Gouveia, Espinhaço Meridional, Minas Gerais, Brasil

Ma. Maíra Lopes Nogueira
Universidade Federal de Minas Gerais

Prof. Dr. Paulo Roberto Antunes Aranha
Departamento de Geologia, Universidade Federal de Minas Gerais

Profa. Dra. Cristina Helena Ribeiro Rocha Augustin
Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais

Resumo

Uma vez infiltrada, a água sofre influência de vários fatores da vertente, como a declividade e as características do regolito, incluindo aquelas do solo, tais como espessura dos seus horizontes, granulometria e porosidade. Dessa maneira, o entendimento do comportamento hídrico ao longo do material de subsuperfície é um aspecto importante para a análise da disponibilidade da água para plantas e também para os mecanismos envolvidos no suprimento de água para o freático. A dinâmica da água subsuperficial no solo influencia ainda a velocidade e taxas de infiltração, o que afeta diretamente o escoamento superficial, ou *runoff*, um dos principais processos erosivos nas áreas tropicais úmidas. Este trabalho tem por objetivo obter e analisar informações mais precisas sobre a dinâmica subsuperficial da água de infiltração em parcelas experimentais, utilizando o método geofísico Caminhamento Geométrico. Os experimentos foram realizados em diferentes condições iniciais de umidade. A metodologia envolveu três etapas principais: 1 – realização de perfis base de Eletroresistividade; 2 – aplicação de uma solução aquosa condutora nos solos; 3 – obtenção de perfis após a aplicação da solução, em intervalos de tempo pré-definidos. A sequência de perfis obtidos permitiu a visualização do movimento da água em subsuperfície. Os resultados demonstram clara diferença no modo como a água infiltra nos dois diferentes tipos de solos da área, revelando também a influência da forma da vertente e ainda a eficácia da metodologia utilizada.

Palavras-chave: vertente; caminhamento geométrico; infiltração e percolação da água; traçador.

Abstract:

Once the rain water infiltrates, its distribution in the subsurface suffers the influence of several slope factors among which are the declivity and the characteristics of the regolith, including those of soil layers, granulometry, and porosity. Therefore, the study of water behavior along the material of the subsurface is an important aspect for the comprehension of water availability for plants as well as for the mechanisms of water supply for the water table. The dynamics of water in the soil influences the velocity of water infiltration what also affects directly the overland flow, a main process of erosion process in humid tropical areas. This study aims to obtain and analyze more precise information about sub-superficial water dynamics at soil plots using the geoelectric 2D profiles methods. The experiments were carried out under different initial conditions of humidity. The methodology involves: 1 obtaining background geophysical profiles from the soils; 2 injection of a conductive water solution on the soil; 3 Obtaining soils geophysical profiles after the application of the water solution with pre-defined time periods. The geophysical profiles sequence allowed the visualization of the subsurface water movement. The results demonstrate clear differences in the way water infiltrates in the two different types of soil revealing also influence of slope form, besides the efficiency of the employed research methodology.

Keywords: slope form; geoelectrical profiles; groundwater; tracer.

Recebido 04/2013
Aprovado 09/2013

nogueira_ml@yahoo.com.br
aranha1941@gmail.com
chaugustin@gmail.com

Introdução

A infiltração de água de chuva é o processo da sua entrada através da superfície do solo. Ao longo de seu caminho pela vertente, a água infiltra em diferentes circunstâncias e velocidades (MORGAN, 1969; KIRKBY, 1969), uma vez que ela passa a ser fortemente influenciada por vários elementos externos e internos da vertente. À movimentação da água ao longo do perfil de solo, dá-se o nome de percolação, cuja dinâmica pode diferir daquela associada com a infiltração. Os fatores externos que afetam a infiltração da água de escoamento superficial encontram-se relativamente bem analisados, como demonstram, entre outros, os trabalhos de Kirkby (1978), Thurler *et al.* (1996), Weiler (2001) e, na área de pesquisa, os de Ádamo (2001), Barbosa *et al.* (2002), Barbosa (2004), Portilho (2003), Marchioro (2003), Augustin *et al.* (2006), Marchioro *et al.* (2007) e Morais (2007). De acordo com esses trabalhos, o fluxo da água varia em volume, velocidade, direção e profundidade de resposta, além das propriedades do solo, em função de fatores como as suas condições prévias de umidade, litologia, cobertura vegetal, pluviosidade, tipos de coberturas de superfície (ex.: camada selante), declividade, forma da vertente, além da cobertura vegetal. Entre os fatores internos, encontram-se aqueles vinculados às características das raízes, do solo e condições de umidade prévia do perfil, entre outros.

Autores como Kirkby (1978), no entanto, atribuem a infiltração e a percolação da água no solo como sendo diretamente dependentes da atuação, conjunta ou isolada, de fatores como o clima, em suas variáveis temperatura, insolação, precipitação, umidade do ar e vento; cobertura vegetal, quanto ao tipo e densidade; o relevo, no que se refere à forma e declividade da vertente; além do o solo propriamente dito, o que inclui a textura, estrutura, porosidade, teor de matéria orgânica e umidade inicial.

Permanecem, contudo, questões em aberto no que se refere à relação e à compreensão da dinâmica da água na subsuperfície, como, por exemplo, sua forma da penetração e os movimentos de percolação na subsuperfície, para os quais há necessidade de aprofundamento das pesquisas (NOGUEIRA, 2008; NOGUEIRA *et al.*, 2011). Isto porque o estudo da infiltração e percolação da água no solo tem grande importância para vários campos de pesquisa, uma vez que a infiltração responde pela disponibilização de água para manutenção da cobertura vegetal, seja ela natural ou plantada. Como destacado por Booher (1974), ela é fundamental para a definição de práticas agrícolas, bem como para a correta identificação de técnicas de conservação do solo.

Sob a perspectiva geomorfológica, a infiltração e percolação são processos essenciais para a compreensão de como se dá a recarga dos níveis freáticos e qual o impacto da infiltração a médio e longo prazos sobre as bacias de drenagem. Da mesma maneira, são eles os responsáveis, em grande parte, pela disponibilização da água para os efeitos do escoamento superficial (HORTON, 1945). Quanto menores as taxas de infiltração, maior tende a ser o fluxo hortoniano, aumentando sua energia para promover a erosão do material superficial do regolito. Portanto, além de encontrar-se diretamente associado à erosão, o fluxo superficial afeta o fluxo dos rios, seja através da realimentação dos níveis freáticos, seja através da chegada da água e sedimentos diretamente aos leitos dos rios, aumentando a velocidade e volume de descarga dos mesmos, além do transporte da carga de sólidos.

Nesse sentido, a compreensão dos fatores que afetam a infiltração é de fundamental importância para a análise não somente dos aspectos vinculados ao uso e ocupação dos solos, como também da dinâmica geomorfológica e do seu papel na elaboração das formas de relevo.

Este estudo foi desenvolvido em Gouveia, município localizado na porção meridional da Serra do Espinhaço, em Minas Gerais (Fig. 1), e tem como objetivo obter e analisar informações mais precisas sobre a dinâmica subsuperficial da água de infiltração em parcelas experimentais, utilizando o método geofísico Caminhamento Geométrico. Neste trabalho, procura-se mostrar que fatores podem estar associados à capacidade de infiltração dos solos, sendo parte de uma das temáticas mais investigadas na região, ou seja, a erosão provocada pela água de chuva, que constitui um dos processos mais importantes no refeitoamento (*reshaping*) das vertentes (AUGUSTIN, 1995a, 1995b; ÁDAMO, 2001; ARANHA, 2002; BARBOSA *et al.*, 2002; MARCHIORO *et al.*, 2004; PORTILHO *et al.*, 2006; AUGUSTIN *et al.*, 2006; NOGUEIA *et al.*, 2011).

Para a realização desta pesquisa, partiu-se do princípio de que a dinâmica da água superficial e subsuperficial, embora sofra influência de vários fatores climáticos, como precipitação média e total de cada evento chuvoso, efeito da sazonalidade, índices de evapotranspiração, frequência das chuvas, entre outros, localmente, encontra-se diretamente relacionada a elementos geomorfológicos da vertente, tais como as formas convexas, côncavas e retilíneas, as microformas, os solos e a hidrografia, inerentemente integrados à própria vertente. Esses elementos têm efeitos também imediatos sobre a evolução dos solos, e sobre o tipo e intensidade dos processos associados ao escoamento da água (BIRKLAND, 1981; AUGUSTIN, 1995a).

A ênfase na vertente justifica-se por esta integrar todos os elementos internos que afetam a infiltração e percolação da água no solo, além de parte expressiva dos externos. Nesse sentido, a obtenção de informações mais precisas sobre a atuação da água em subsuperfície se reveste de grande importância, principalmente quando correlacionada a outros dados, entre eles a configuração da vertente, com seus componentes podendo ou não atuar como condicionantes de maior ou menor fluxo superficial ou infiltração da água.

Optou-se, nesta pesquisa, pelo uso de traçadores, que constitui uma das maneiras de se avaliar o comportamento do fluxo hídrico na subsuperfície, uma vez que seu emprego possibilita acompanhar o movimento da água no meio poroso, o que, em muitos casos, propicia a obtenção de informações além das fornecidas pelos métodos convencionais (ROLDÃO; LOPES, 1988; SCANLON *et al.*, 1997). Um traçador pode ser definido, no caso específico de fluxos subterrâneos, como uma matéria ou energia carregada pela água, que fornece informações concernentes à direção e/ou velocidade da água (DAVIS *et al.*, 1980). As técnicas envolvendo o uso de traçadores consistem em injetar, em determinados pontos do maciço, uma substância que permita marcar e definir a massa d'água que se desloca através de poros ou fraturas (ROLDÃO; LOPES, 1988).

Segundo Drumond (2004), várias substâncias podem ser classificadas como traçadoras, a exemplo de isótopos radioativos (como o Carbono 14), cátions (como Na^+ , K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+}), ânions (como Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} e NO_3^-), sais (NaCl e KCl) e corantes (como *Brilliant Blue FCF*, *Fast Green FCF*, *Yellow FF*, *Violet of Paris* e *Congo Red*). O uso dos traçadores corantes (ou colorimétricos), como os utilizados nesta pesquisa, que são substâncias artificiais, tem se tornado uma prática comum em pesquisas que buscam o entendimento dos fluxos na zona não saturada do solo (FLURY; FLÜHLER, 1994; FORRER, 1997; AEBY, 1998; HONAUER, 2002; FLURY; WAI, 2003; KIM *et al.*, 2004).

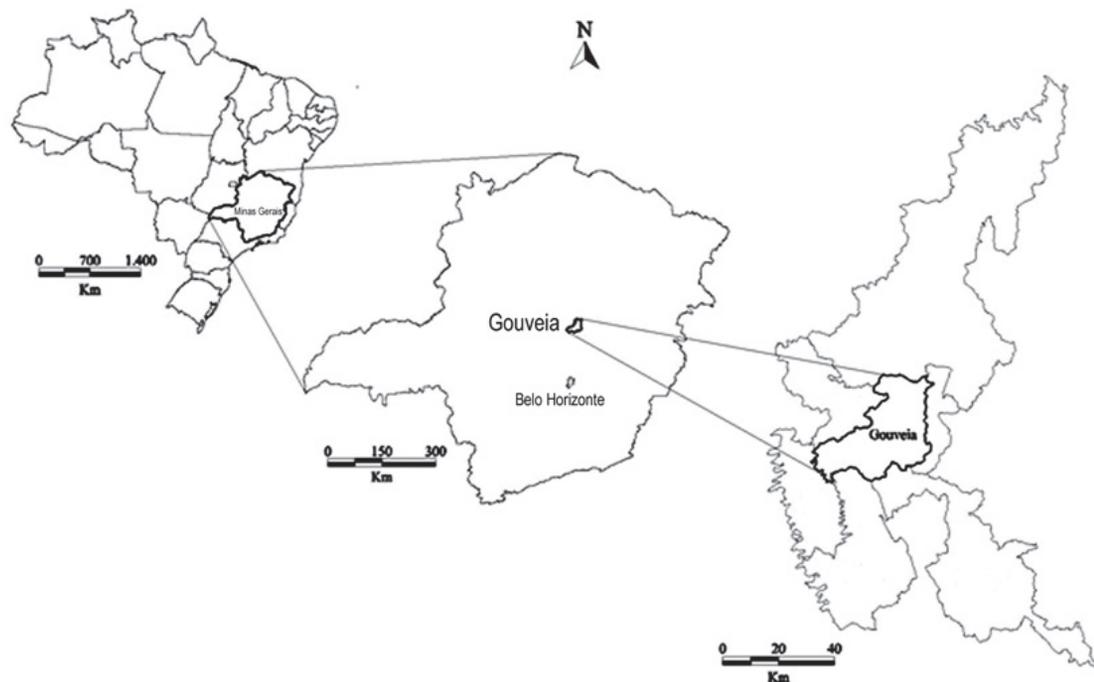
Para destacar a pluma em subsuperfície, deve-se utilizar um traçador para a água. O cloreto de sódio (NaCl) destaca-se como um dos mais utilizados traçadores salinos, uma vez que as alterações que ele provoca no meio – em especial na condutividade elétrica e na alcalinidade da água – apresentam

fácil monitoramento multitemporal, podendo ser avaliados tanto por métodos destrutivos (tradagem, abertura de trincheiras), quanto por métodos não destrutivos (caminhamento elétrico, georradar).

Características da área de estudo

A área de estudo localiza-se no município de Gouveia, na porção meridional da Serra do Espinhaço, entre as latitudes 18°25' e 18°38' S e longitude 43°42' e 43°50' (Fig. 1), na bacia do Córrego do Quebra, uma bacia de 3ª ordem, próxima ao distrito de Cuiabá. O córrego do Quebra é afluente do Ribeirão dos Pereiras, que, por sua vez, é afluente do Ribeirão do Chiqueiro.

Figura 1 Localização da área de estudo.



O clima da região de Gouveia é influenciado pela presença de sequências de serras com denominações locais, todas fazendo parte da Serra do Espinhaço, e é classificado como Tropical Sub-Úmido (Gouveia, 2002), com duas estações bem definidas: verão quente e chuvoso, e inverno ameno e seco. A precipitação média anual é de 1.400 mm, concentrada essencialmente de outubro a março.

A vegetação original predominante no município é o Cerrado, que se encontra degradado em função das atividades agropecuárias, com a substituição das espécies nativas por pastagens (AUGUSTIN, 1995a).

A região de Gouveia é caracterizada pela exposição de rochas do embasamento cristalino, numa faixa de direção N/S, denominada Depressão de Gouveia, limitada por rochas do Supergrupo Espinhaço, formadas predominantemente por quartzitos. Tanto as rochas do embasamento cristalino, quanto as do Supergrupo Espinhaço, sofreram intrusões de diques e soleiras de rochas metabásicas. As rochas granito-gnáissicas do embasamento arqueano – Complexo Gouveia – foram expostas

pela erosão, encontrando-se bastante alteradas, constituindo regolitos profundos. A Depressão é bordejada predominantemente por escarpas de xistos e quartzitos do Supergrupo Espinhaço.

A maior parte da área a leste da Depressão de Gouveia é drenada pela bacia do córrego do Chiqueiro, na qual está inserida a bacia do córrego do Quebra, localizado na porção N/NW da Depressão de Gouveia, que corre sobre rochas do complexo granítico de Gouveia. Ela é formada por um relevo no qual predominam colinas de topos achatados, longos, e encostas côncavo-convexas suaves, pouco entalhadas, com a presença de feições de anfiteatros e de voçorocas (AUGUSTIN, 1995b).

Metodologia

A vertente longa da margem esquerda do córrego do Quebra foi escolhida para este estudo porque ela se mostrou, ao longo de anos de pesquisa na área, como uma das que apresentam características geomorfológicas mais representativas da região: vegetação de Cerrado, em grande parte substituída por pastagem, drenagens de pequena ordem, substrato de granito-gnaiss e xisto profundamente cisalhados, e a ocorrência de latossolos, em geral com alto grau de lixiviação, e a presença de cambissolos e de neossolos.

As parcelas de amostragem deste estudo encontram-se localizadas em vertente da margem esquerda do córrego do Quebra, com declividade média de 6° e 700 m de comprimento. Uma das parcelas foi colocada na porção superior da vertente, que se apresenta ligeiramente convexa, e a outra parcela na porção mediana, ligeiramente côncava. Na alta vertente, ocorre Cambissolo, enquanto na meia-vertente, Latossolos.

Essas parcelas, que também foram utilizadas por Marchioro (2007), Barbosa (2002) e por Portilho (2003) em pesquisas anteriores na vertente, foram alocadas nos segmentos centrais dos sítios geomorfológicos, identificados segundo metodologia de Wright (1973) e Augustin (1979).

Em trabalho realizado por Ferreira (2002) em outra bacia, a do córrego Rio Grande, foram mapeadas formações superficiais da bacia nas quais a “vertente longa” da margem esquerda do córrego do Quebra é dividida em Unidades Coluviais (C1, C2a e C2b) e em Terraços Fluviais (T1 e T2). Na meia-vertente, recobrimo a porção côncava do relevo, a Unidade Coluvial C1 é geralmente argilo-arenosa, de coloração vermelha e com forte pedogênese na camada superior. Sobre esta cobertura são encontrados, segundo levantamento pedológico realizado por Diniz (2002), Latossolos Vermelhos-amarelos Distróficos típicos. A Unidade Coluvial C2b, que aparece na convexidade da alta vertente, apresenta-se menos espessa que a C1 e resulta em material pedogenético predominantemente argiloso, analisado e classificado por Rocha (2004) como Cambissolo Latossólico.

Diferentemente de outros autores (NEVES *et al.*, 2003; MORAIS *et al.*, 2007), que aplicaram a solução salina por injeção em pontos, no presente estudo ela foi aplicada em áreas. Com isto, foi possível obter respostas contínuas ao longo de um segmento da vertente, e não apenas uma informação pontual. As linhas dos caminhamentos elétricos foram realizadas perpendicularmente ao caimento da vertente, dentro da área das estações em cruz (Fig. 2). Cada estação em cruz permitiu a delimitação de uma área através de uma estrutura de madeira, com as dimensões de 2 m de extensão do centro da cruz à extremidade de cada braço, somando, portanto, 4 m de uma ponta à outra. Assim, têm-se dois segmentos de 4,00 m x 0,20 m que se cruzam no centro, gerando uma área interna de 1,56 m² (Fig. 2). O objetivo deste formato foi o de se obter melhores resultados sobre a direção preferencial do fluxo subsuperficial da água, com a coleta de dados tanto no sentido do escoamento preferencial da vertente, quanto paralelamente a este sentido.

Para investigar a percolação através do método geofísico adotado, optou-se pela adição do NaCl à água, para incrementar o contraste nos imageamentos da subsuperfície, uma vez que este aumenta a condutividade elétrica do solo (BARKER *et al.*, 1998). Assim, para cada estação em cruz foram aplicados 2 kg de cloreto de sódio diluídos em 110 litros de água (a quantidade de água aplicada por área representa o valor pluviométrico médio dos meses em que se executou o ensaio).

Figura 2 **Disposição dos eletrodos dentro da caixa delimitadora da área a receber a solução aquosa (levantamento base). As setas indicam os eletrodos fincados no solo.**



Dentro da área dos braços de cada cruz, foi aplicada uma solução aquosa contendo cloreto de sódio e o corante azul (com função de traçador). Ao longo dessa mesma área, foram obtidos os perfis geoeletricos, em intervalos de tempo previamente definidos, antes e após a injeção do líquido, para se acompanhar a percolação deste em profundidade. Para se evitar ao máximo as perdas por escoamento superficial e para forçar o líquido aplicado a infiltrar, foram escavados pequenos sulcos superficiais, com a profundidade média de 1 cm, onde a estrutura em madeira se encaixou. Com o mesmo propósito, além da 1ª medida foi necessária também a colocação de pequenos volumes de terra nas bordas da estrutura.

O método do caminamento elétrico é um tipo de aquisição geofísica 2D (x, z) e, como foram obtidos perfis em épocas diferentes para o mesmo local, tem-se então uma aquisição 3D ($x, z, e t$; onde t é a variação temporal). Cada perfil de eletrorresistividade obtido tem um comprimento de 8 metros. A área retangular onde se aplicou a solução salina sob os eletrodos tem 4 metros e está

centralizada na linha (Fig. 3). Desta maneira, o centro da área coincide com o centro dos perfis geoeletricos, sendo suas extremidades as posições 2 e 6.

O equipamento utilizado foi o resistivímetro ABEM Terrameter, que emite uma corrente elétrica contínua de baixa frequência (4 Hz) por intermédio de dois eletrodos, “A” e “B”. Com a injeção da corrente no solo, ocorre sua “distribuição” na subsuperfície, e é gerada uma diferença de potencial no terreno que é medida por outro par de eletrodos, “M” e “N”. Ao se afastar os eletrodos, aumenta-se a profundidade da leitura em subsuperfície. Para a obtenção do caminhamento elétrico, foram posicionados 19 eletrodos metálicos de aço inox enterrados no solo.

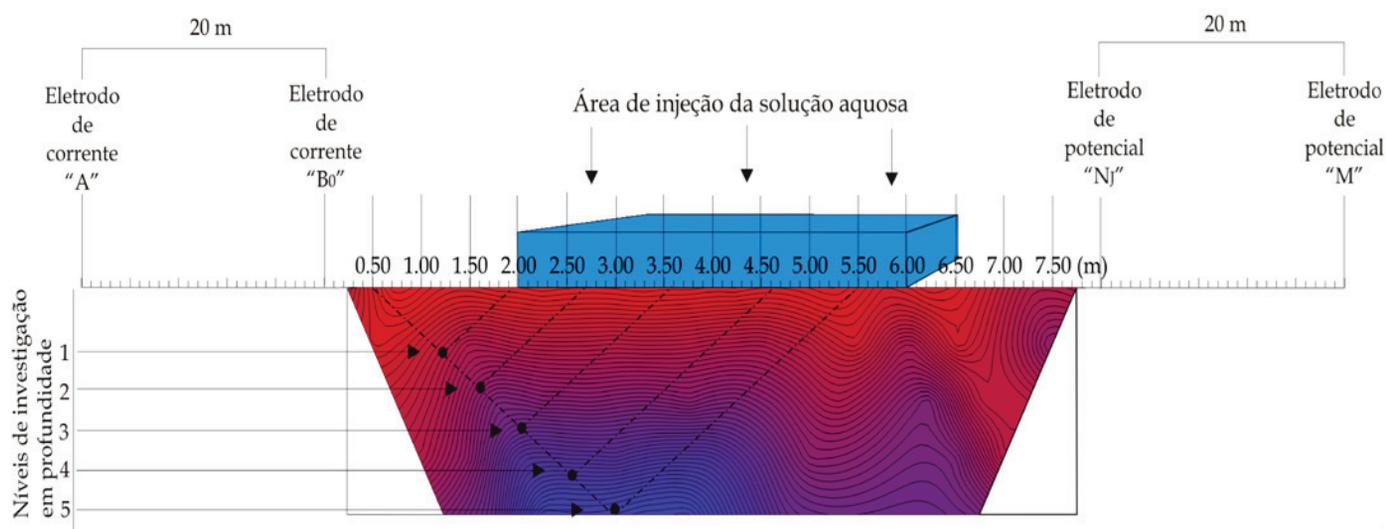
Figura 3 **Medida de eletrorresistividade realizada após a injeção da solução traçadora; as setas indicam os eletrodos.**



Todas as medidas foram realizadas com o arranjo polo-polo do tipo “Cacau” (NERY *et al.*, 1995), em que os eletrodos são dispostos no solo, ficando fixos os eletrodos extremos da linha, o “A” (corrente) e o “M” (potencial). Ao todo, foram obtidos cinco níveis de investigação (Fig. 4).

Neste arranjo, os eletrodos podem ser colocados a uma distância “muito grande” em relação a “B” (corrente) e “N” (potencial), fazendo com que se tenha uma situação do tipo monopolo. A distância do eletrodo de corrente “A” até a posição inicial do outro eletrodo de corrente “B”, como também a distância do eletrodo “N” em sua posição final (“J”) até o eletrodo “M”, foram de 20 m. As distâncias entre os eletrodos “B” e “N”, e o máximo de afastamento entre eles, foram de 0,5 m e 2,5 m, respectivamente.

Figura 4 Esquema representativo da disposição dos eletrodos no arranjo "Cacau".



Os dados foram processados através de planilha eletrônica para a elaboração das seções de pseudopropriedade, e depois foi realizada a inversão dos dados utilizando o software Res2dinv. Finalmente, as seções foram interpretadas em função das variações das resistividades apresentadas, correlacionando-as com características geomorfológicas da área.

Outros métodos de investigação das características das parcelas envolveram análises das características dos solos por meio da abertura de trincheiras nas duas porções da vertente, bem próximas às cruces, para análise do solo e para visualização direta da pluma.

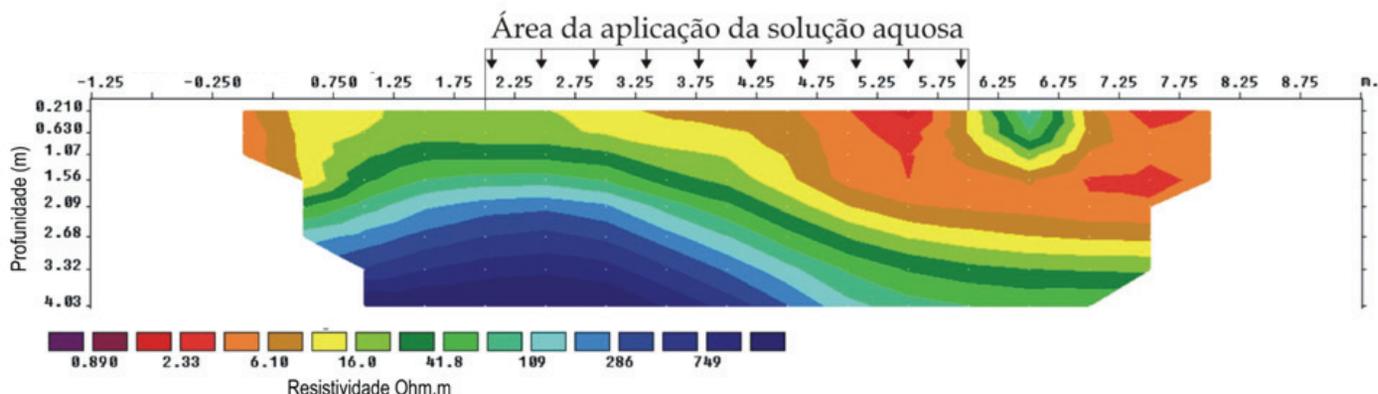
Resultados e discussão

Os resultados são analisados em função dos locais de estudos, na alta e na média vertente.

Parcela da alta vertente

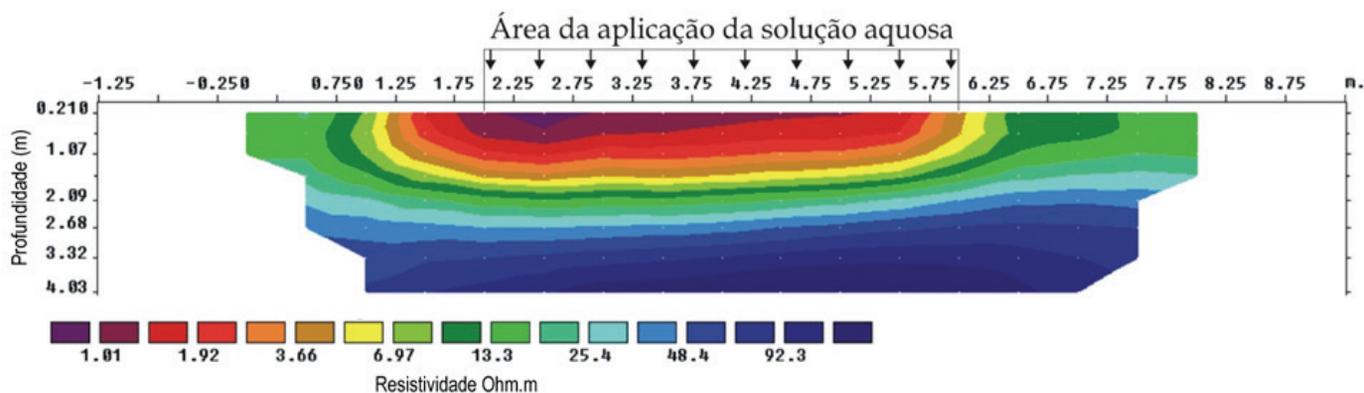
Antes de se aplicar a solução salina, foi obtido o perfil base de eletrorresistividade, com o solo em condições naturais de umidade. Este perfil, registrado no dia 26/10/2006, serviu de parâmetro para análise dos perfis seguintes (Fig. 5). Como pode ser observado nesta figura, a seção, após a inversão dos dados, mostra-se ligeiramente menos resistiva próximo à superfície, a uma distância maior do que 4 m, muito provavelmente devido à chuva ocorrida no dia anterior.

Figura 5 Perfil base de eletrorresistividade da alta vertente no início do período chuvoso.



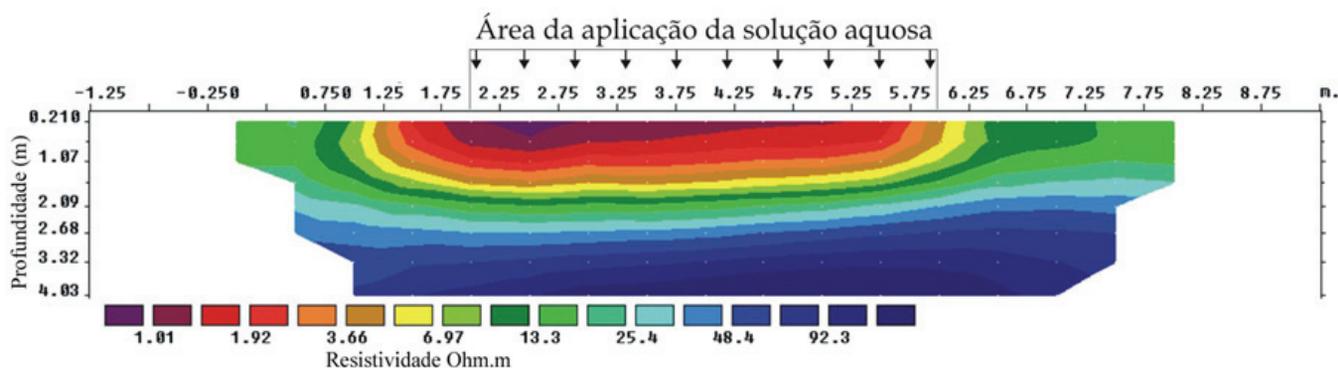
Das 11:15 às 12:30h do dia 26/10/2006, procedeu-se à aplicação da solução salina na área definida. A primeira medida foi realizada 4 horas e 30 minutos após o término da aplicação. Nesta seção, como mostra a figura 6, já é notável o efeito da água na subsuperfície: uma faixa menos resistiva aparece na parte superior do perfil, mostrando o início da descida do fluxo, de maneira regular, mas com concentração do lado direito do perfil, em torno da área que já se mostrava mais condutora no levantamento base.

Figura 6 Perfil de eletrorresistividade da alta vertente no início do período chuvoso, 4 horas e 30 minutos após a aplicação da solução aquosa.



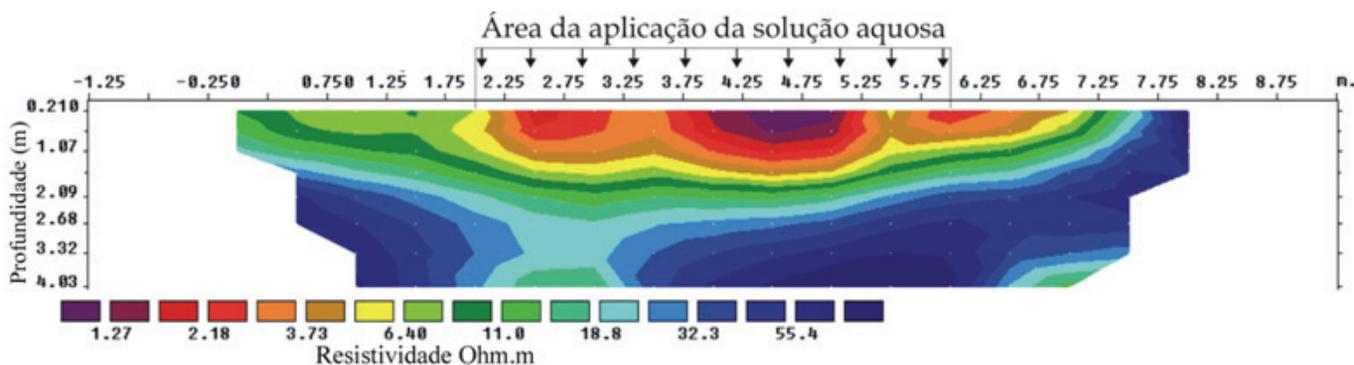
No dia seguinte, 20 horas após o término da aplicação da solução salina, foi realizada a segunda medida, ilustrada pela figura 7. Nesta, é possível verificar um discreto alcance da pluma numa profundidade maior. Na comparação com o perfil anterior, nota-se que ocorreu uma concentração dos valores da baixa resistividade na porção central do perfil, com abrangência também no lado esquerdo, ultrapassando a área de aplicação da água.

Figura 7 Perfil de eletrorresistividade da alta vertente no início do período chuvoso, 20 horas após a aplicação da solução aquosa.



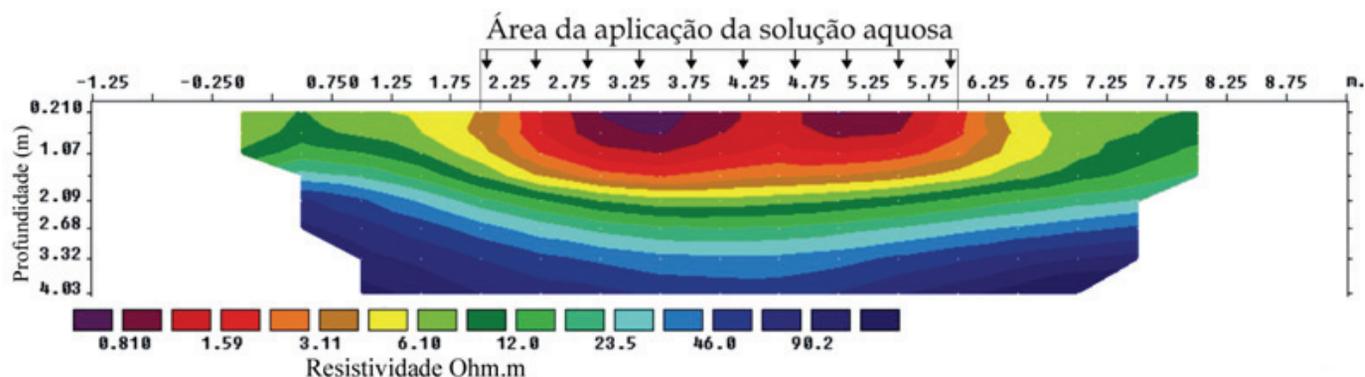
No dia 28/10/06, quase dois dias após o término da aplicação da solução salina, foi realizada a terceira medida. Os valores de resistividade observados na seção são menores neste perfil, e certamente foram afetados pela precipitação ocorrida na madrugada do dia 27 para o dia 28, fazendo com que a pluma não se apresentasse homogênea, como pode ser observado na figura 8.

Figura 8 Perfil de eletrorresistividade da alta vertente no início do período chuvoso, 43 horas e 30 minutos após a aplicação da solução aquosa.



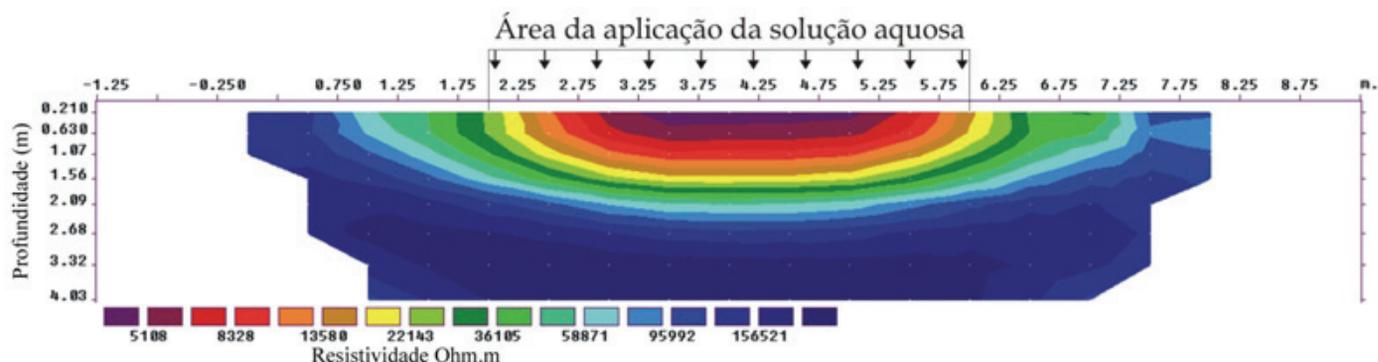
Na semana seguinte, 7 dias e 3 horas após a injeção aquosa (realizada no dia 02/11/2006), foi registrada a quarta medida. Observa-se que essa seção (Fig. 9) ainda não apresentou valores resistivos baixos próximos à superfície, resultantes da precipitação ocorrida nos dias anteriores à medição (dias 29, 30 e 31/10/2006).

Figura 9 Perfil de eletrorresistividade da alta vertente no início do período chuvoso, 7 dias e 3 horas após a aplicação da solução aquosa.



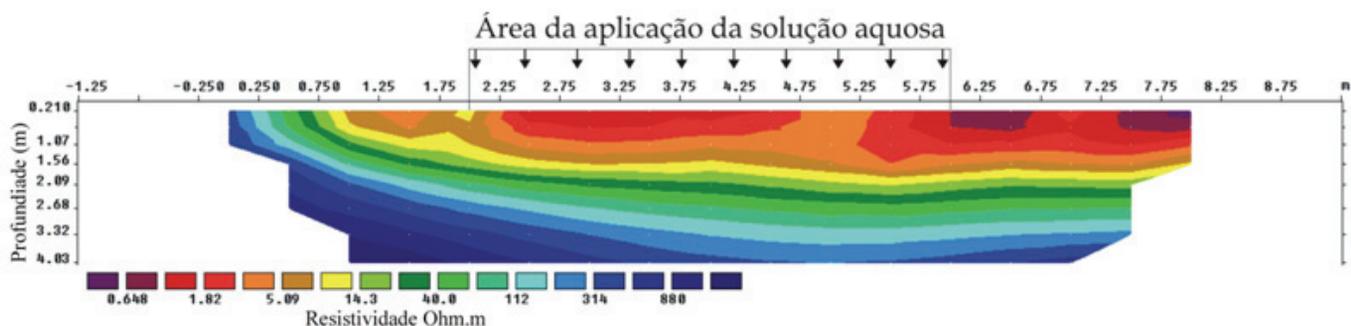
Na quinta medida, quase duas semanas depois da aplicação da solução salina, é possível observar na seção (Fig. 10) que a resistividade relacionada à pluma distribuiu-se de modo mais homogêneo e horizontalizado, preferencialmente centralizados no perfil.

Figura 10 Perfil de eletrorresistividade da alta vertente no início do período chuvoso, 13 dias e 22 horas após a aplicação da solução aquosa.



A sexta e última medida foi feita 4 semanas após a injeção aquosa, no dia 23/11/06. O grande volume de chuva precipitado nos dias antecedentes a esta medição voltaram a interferir na resposta dos valores de resistividade. Observa-se que os valores baixos de resistividade abrangem quase toda a porção superior da seção (Fig. 11), indo muito além dos limites da área retangular onde se aplicou a água inicialmente, principalmente à direita do perfil.

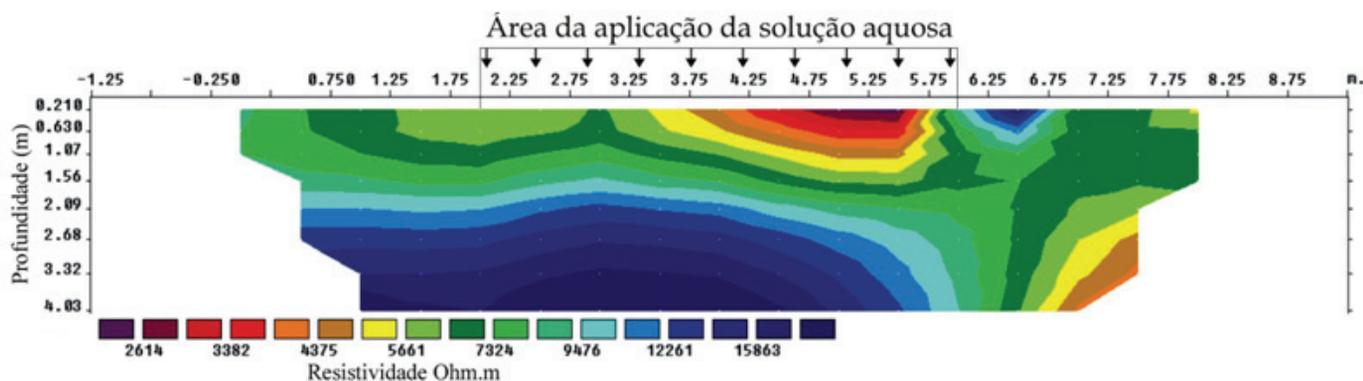
Figura 11 Perfil de eletrorresistividade da alta vertente no início do período chuvoso, 27 dias e 23 horas após a aplicação da solução aquosa.



Parcela da meia-vertente

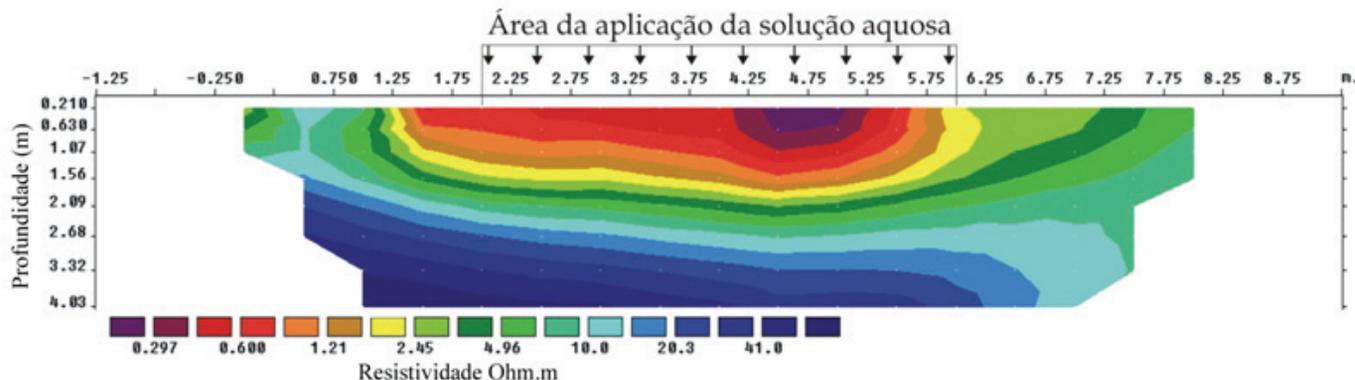
Assim como na alta vertente, antes de se aplicar a solução salina, foi realizado o perfil base de eletrorresistividade, com o solo em condições naturais de umidade. Este perfil também foi obtido no dia 26/10/2006, e serviu de parâmetro para análise dos perfis seguintes. A seção invertida (Fig. 12) mostra valores ligeiramente menos resistivo próximo à superfície, em especial à direita do centro, muito provavelmente devido à chuva ocorrida no dia anterior.

Figura 12 Perfil base de eletrorresistividade da média vertente no início do período chuvoso.



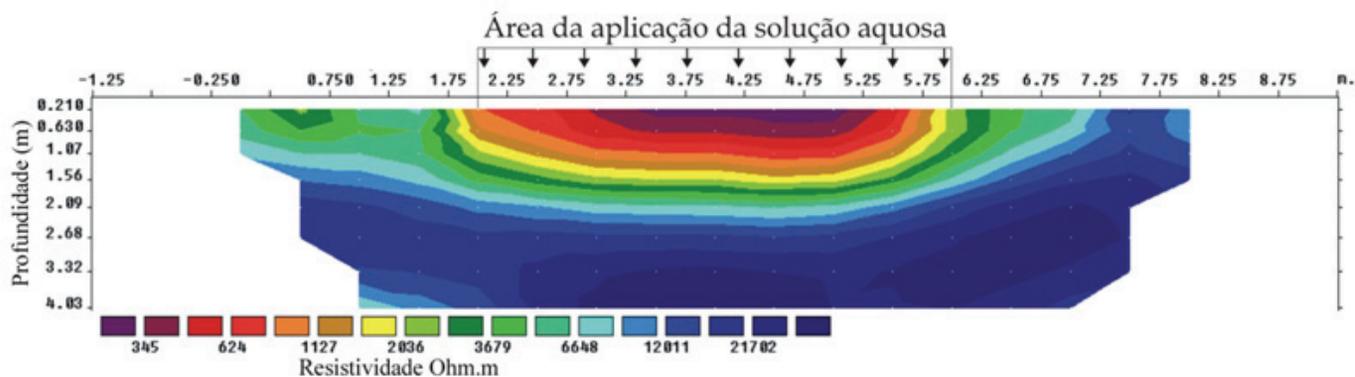
Das 11:45 às 12:30h do dia 27/10/2006 procedeu-se à aplicação da solução salina na área definida. 3 horas e 30 minutos após o término da aplicação, foi realizada a 1ª medida. Na seção invertida (Fig. 13), é visível o efeito da água na subsuperfície: uma faixa menos resistiva aparece na parte superior do perfil, mostrando o início da descida do fluxo, de modo relativamente regular. Aparentemente, o fluxo foi mais claramente registrado à esquerda do perfil, avançando além dos limites da área retangular, mas o maior alcance em profundidade deu-se mais próximo ao centro, em torno do ponto onde se mostrava mais condutor no levantamento base (Fig. 11).

Figura 13 Perfil de eletrorresistividade da média vertente no início do período chuvoso, 3 horas e 30 minutos após a aplicação da solução aquosa.



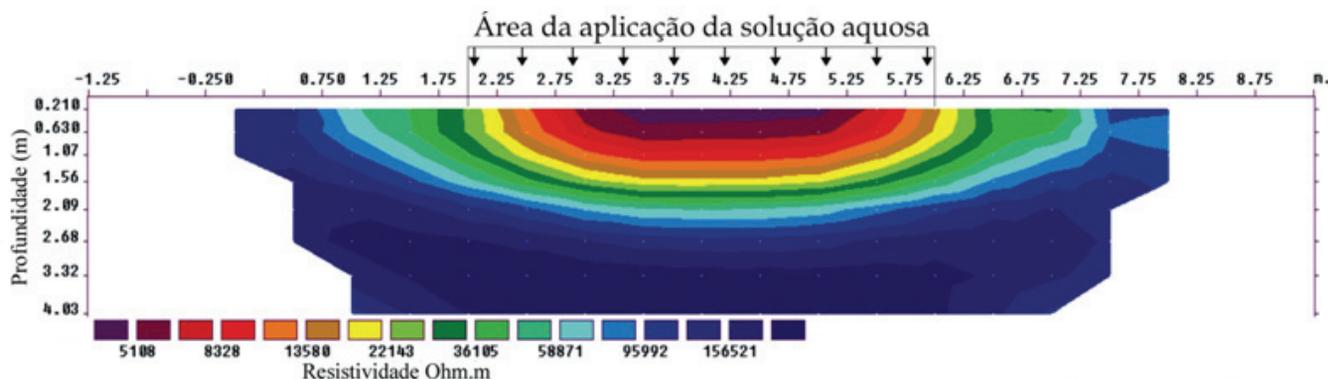
No dia seguinte, 23 horas após o término da aplicação da solução salina, foi realizada a 2ª medida. Ao se comparar esta seção (Fig. 14) invertida com o perfil anterior (Fig. 13), nota-se que os valores baixos de resistividade estão mais concentrados na porção central do perfil e dentro dos limites da caixa retangular, mostrando ainda uma moderada tendência de se aprofundar mais à direita do centro (Fig. 14).

Figura 14 Perfil de eletrorresistividade da média vertente no início do período chuvoso, 23 horas após a aplicação da solução aquosa.



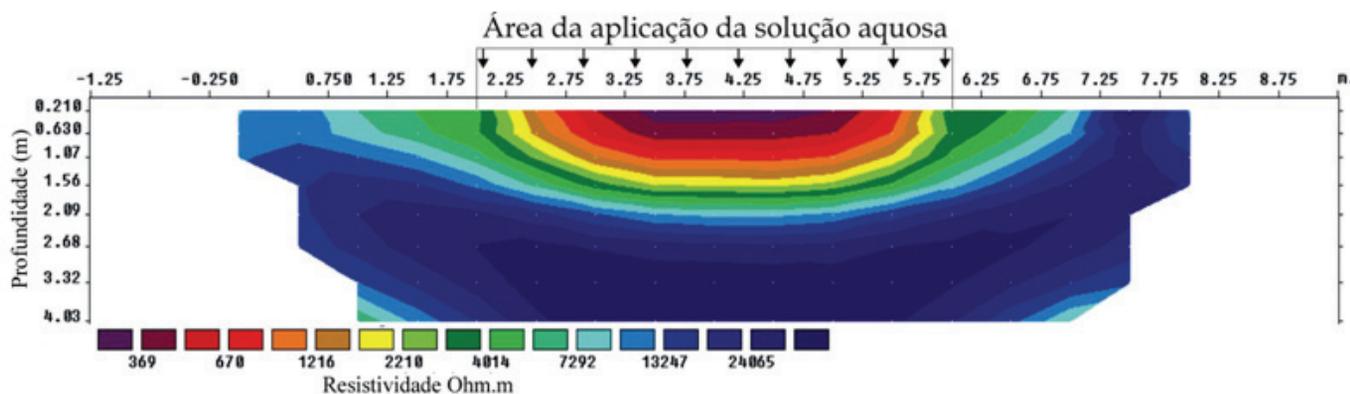
Na semana seguinte, 8 dias e 1 hora após a injeção aquosa, no dia 02/11/2006, foi realizada a 3ª medida. É possível observar, nesta seção invertida, que os valores de resistividade desenham uma forma mais abaulada bem centralizada no perfil (Fig. 15), sendo sutilmente visível a descida do fluxo em sua porção central, permanecendo dentro dos limites da área de aplicação da solução salina.

Figura 15 Perfil de eletrorresistividade da média vertente no início do período chuvoso, 8 dias e 1 hora após a aplicação da solução aquosa.



Na 4ª medida, quase duas semanas depois da aplicação da solução salina, e após alguns eventos chuvosos, observa-se, na seção invertida (Fig. 16), que os valores de resistividade baixos pouco se alteraram em relação à semana anterior, apresentando uma tendência de maior centralização no perfil.

Figura 16 Perfil de eletrorresistividade da média vertente no início do período chuvoso, 15 dias após a aplicação da solução aquosa.



Conclusões

Os perfis de eletrorresistividade obtidos nas duas porções da vertente registraram nitidamente a presença da água na subsuperfície do perfil estudado. De certa forma, os eventos chuvosos interferiram na leitura da água aplicada artificialmente, uma vez que a metodologia aplicada é sensível justamente a materiais condutores, como o é a água no solo. Todavia, pode-se inferir que o que se observa de mais condutor em profundidade nos perfis seja o avanço da borda inferior da pluma aplicada no primeiro dia do experimento.

Os perfis base foram obtidos em um dia de precipitação. Ao comparar os perfis base das duas posições da vertente, nota-se que o da meia-vertente apresenta valores de resistividade mais baixos. Esta constatação encontra explicação no fato de que esta porção da vertente apresenta maior capacidade de receber, deixar percolar e reter água. Conforme apontado anteriormente, isto se deve essencialmente à influência da forma côncava dessa porção da vertente, da sua maior cobertura vegetal, e dos maiores valores de argila, microporosidade e, especialmente, da melhor estruturação do seu solo. Já a alta vertente apresenta menor percentagem de cobertura vegetal e maior cobertura de capa argilo-siltosa (selante), além de declividades mais acentuadas, fatores que favorecem o escoamento superficial, em detrimento da infiltração.

A comparação dos perfis de eletrorresistividade das duas porções da vertente mostra uma maior homogeneidade da percolação da pluma na meia-vertente, com um componente vertical mais definido e centralizado. Por sua vez, a percolação é mais desordenada na alta vertente, e apresenta um maior espalhamento horizontal. Isto pode ser explicado pela macroporosidade e maior teor de areia do Cambissolo da alta vertente, contrapondo-se ao Latossolo da média, que é um solo mais bem estruturado e homogêneo. Outra explicação pode ser dada com base nos experimentos de Neto (1994): a maior produção de fluxo lateral de água ocorre no solo menos úmido, e na componente vertical no solo mais úmido, corroborando os dados obtidos nas medições de tensão do solo (NOGUEIRA, 2007). Também pelo efeito da convexidade típica dos topos e alta vertente, que tende a espalhamento da água, tanto de superfície, quanto, como demonstrado neste trabalho, de subsuperfície.

Os perfis de eletrorresistividade apresentam espacialmente bastante homogeneidade, não sendo possível a identificação de uma direção do fluxo preferencial. Isto provavelmente se deve ao fato de a pluma de água ter sido aplicada homogeneamente ao longo de uma área, e não em pontos de injeção, como é mais comum nos estudos de eletrorresistividade.

Dos sete perfis obtidos na alta vertente, quatro apresentam menores valores de resistividade no lado direito do perfil, o que pode ser interpretado como uma resposta ao leve caimento da vertente para esse lado, apontando para a importância da declividade no comportamento da água na subsuperfície.

A escala de profundidade indicada no eixo esquerdo das figuras não condiz muito com a profundidade real alcançada, se esta for tomada como o observado em coloração azul na abertura das trincheiras. A aproximação mais real da posição da pluma (no final) corresponde àquela dos valores nas cores arroxeadas, que não ultrapassam muito os 60 cm de profundidade. Contudo, era previamente sabido que o caminhamento elétrico (método de eletrorresistividade) não apresenta precisão no cálculo das profundidades. A abertura das trincheiras para observação do traçador azul revelou um baixo alcance da pluma em profundidade, o mesmo tendo sido também registrado nas medidas de eletrorresistividade. Isto aponta para o fato de que o resistímetro é tão sensível à água mais livre quanto à água retida em microporos ou adsorvida por argila.

Agradecimento: agradecemos à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo apoio financeiro ao projeto (CRA-1189-05) que deu suporte a esta pesquisa.

Referências

- AUGUSTIN, C. H. R. R. **A preliminary integrated survey of the natural resources near Alcantarilla, Southeast Spain**. Master of Science Thesis. 1979. 243f. Department of Geography, University of Sheffield, Sheffield, UK. 1997.
- _____. **Geökologische Studien im südlichen Espinhaçogebirge bei Gouveia, Minas Gerais, Brasilien unter besonder Berücksichtigung der ndaschaftsentwicklung**. Tese de Doutorado. 294f. 1995. Johann Wolfgang Goethe Universität, Frankfurt a. Main, Alemanha. 1995a.
- _____. Aspectos geomorfológicos da região de Gouveia, Espinhaço Meridional, MG. In: Simpósio de Geologia de Minas Gerais, 8º, 1995, Belo Horizonte. **Anais do 8º Simpósio de Geologia de Minas Gerais**. SBG. Belo Horizonte, v. 1, p. 3-4. 1995b.
- AUGUSTIN, C. H. R. R.; ARANHA, P. R. A. Piping em área de voçorocamento, noroeste de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Ano 7, n. 1, p. 9-18, 2006.
- BARKER, R. D.; MOORE, J. The application of time-lapse electrical tomography in groundwater studies. **The Leading Edge**, 17, n. 10, p. 1454-1458, 1998.
- BARBOSA, V. C. C.; AUGUSTIN, C. H. R. R. Estudo preliminar de micro-formas e da cobertura vegetal na geração do runoff e perda de solo em vertente do município de Gouveia, MG. **Geonomos**, v. VIII, n. 2, p. 1-7, 2000.
- BIKLAND, P. W. **Soils and Geomorphology**. New York: Oxford University Press, 1984, 372 p.
- DINIZ, A. D. **Levantamento pedológico da porção norte da bacia do ribeirão do Chiqueiro – Gouveia, MG, e a relação entre as classes de solos e a erosão**. Dissertação de Mestrado em Geografia. 2002. 197f. Departamento de Geografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG.
- FERREIRA, A. O. **Mapeamento das formações superficiais da bacia do córrego do Rio Grande – Depressão de Gouveia (Serra do Espinhaço Meridional/MG)**. Dissertação de Mestrado em Geociências, 2002. 138f. Departamento de Geografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG.
- GOUBEIA, L. L. A. **Aspectos da circulação atmosférica no município de Gouveia – Minas Gerais e suas relações com a topografia local**. Dissertação de Mestrado em Geografia, 2002, 58f. Departamento de Geografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG.
- HAGREY, S. A.; MICHAELSON, J. Resistivity and percolation study of preferential flow vadose zone at Bokhorst, Germany. **Geophysics**, v. 64, n. 3, p. 764-753, 1999.
- KIRKBY, M. J. (Ed). **Hillslope Hydrology**. Great Britain: Wiley-Interscience, 1978. 389 p.
- MARCHIORO, H.; AUGUSTIN, C. H. R. R. Dimensões de parcelas experimentais: influência do escoamento superficial e erosão do solo em Gouveia/MG. **Geografias**, v. 3, n. 2, 2007, p. 7-16.
- MORAIS, F. **Estudo dos fatores pedogeomorfológicos intervenientes na infiltração em zonas de recarga no Complexo Metamórfico Bação, Minas Gerais**. Tese de Doutorado em Geociências. 2007. 132f. Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, MG.
- MORAIS, F.; BACELLAR, L. A. P.; ARANHA, P. R. A. Study of flow in vadose zone from electrical resistivity surveys. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 26, n. 2, p.115-122, 2007.
- NERY, A. C. F.; ARANHA, P. R. A. Uma nova metodologia em prospecção geoeletrica: metodologia Cacao. In: International Congress of the Brazilian Geophysical Society, 4th, 1995, Rio de Janeiro. **Anais of the 4th International Congress of the Brazilian Geophysical Society**. Rio de Janeiro: 1995. v.

- II, p. 996, 1995.
- NETO, M. D. Métodos de medição da água no solo: uma breve discussão. **Geonomos**, v. 2, n. 2, p. 51-56, 1994.
- NEVES, A. P. V. B.; LUIZ, J. G. Estudo do fluxo subterrâneo por imageamento elétrico. In: International Congress of the Brazilian Geophysical Society, 8th, 2003, Rio de Janeiro. **Anais of the 8th International Congress of the Brazilian Geophysical Society**. Rio de Janeiro: 2003. 4 p.
- NOGUEIRA, M. L. Estudo do comportamento da água em subsuperfície em parcelas, na vertente da bacia do córrego do Quebra, Gouveia, Minas Gerais. Dissertação de Mestrado em Geografia. 2008. 172p. Departamento de Geografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG.
- NOGUEIRA, M. L.; AUGUSTIN, C. H. R. R.; ARANHA, P. R. A. Estudo da Dinâmica de Percolação da Água no Solo - Gouveia, Minas Gerais, Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 12, n. 3, p. 75-82, 2011.
- PORTILHO, S.
Perda de solo por escoamento superficial e os padrões de infiltração e percolação da água no solo, microbacia do Córrego Quebra, Gouveia, Espinhaço Meridional, MG.
 Dissertação Mestrado em Geografia. 2003. 117f. Departamento de Geografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG.
- ROCHA, L. C.
Caracterização pedológica em duas vertentes na Bacia do Córrego do Quebra - Gouveia/MG.
 Dissertação de Mestrado em Geografia. 2004. 110f. Departamento de Geografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG.
- WHITE, P. A.
 Electrode arrays for measuring groundwater direction and velocity. **Geophysics**, v. 57, n. 2, p. 192-201, 1994.
- WRIGHT, R. L. An examination of the value of site analysis in field studies in tropical Australia. **Zeitschrift der Geomorphologie**, Stuttgart, n. 17, p. 157-183, 1973.