

INVESTIGAÇÃO DA RECARGA DO TIPO LOCALIZADA NOS AQUIFEROS CÁRSTICOS DO GRUPO BAMBUÍ EM REGIÃO SEMI-ÁRIDA, NORTE DE MG

Letícia Teixeira Palla Braga¹; Leila Nunes Menegasse Velásquez²; Peter Marshall Fleming³; Paulo César Horta Rodrigues⁴; Sérgio Melo da Silva⁵

RESUMO - A recarga localizada é de grande importância em regiões (semi-)áridas e a presença de dolinas nesses ambientes climáticos favorece a concentração do escoamento superficial, as quais podem ser apontadas como zonas favoráveis à recarga do tipo localizada para os aquíferos cárstico-fissurais. O município de Verdelândia se insere em ambos os contextos, climático (semi-árido) e geomorfológico (carste da unidade neoproterozóica do Grupo Bambuí), fortemente marcado pela presença de dolinas. Com o objetivo de compreender as origens e processos de recarga locais, apresentam-se os procedimentos e aparatos instalados em duas dolinas e em seis zonas de interflúvio, visando o seu monitoramento hidrológico. Nas dolinas foram medidas a precipitação, variações do nível d'água freático e superficial acumulada; nos interflúvios, mediram-se a precipitação e o acumulado dentro de infiltrômetros de gaveta. Resultados preliminares permitem inferir o importante papel das dolinas na recarga aquífera do tipo localizada, a qual é favorecida pelas condições de chuvas concentradas e intensas características da região, que promovem o elevado escoamento superficial na depressão. E nas áreas de interflúvio comprovou-se que não ocorre infiltração direta.

Palavras-Chave: dolinas – recarga localizada - semi-árido

ABSTRACT -- The localized recharge is of great importance in (semi-) arid regions and the presence of dolines in these climatic environments favour the runoff concentrations, and thus, they are identified, for karst fissured aquifers, as favorable recharging areas. The Verdelândia municipality is inserted in both contexts, climate (semi-arid) and geomorphology (Neoproterozoic karst unit Bambuí Group), strongly marked by the presence of dolines. Aiming to understand the origins and processes of recharge areas, it is presented the procedures and devices installed in two

¹ Mestranda em Geologia Econômica UFMG – letsteixeira@gmail.com

² Doutora em Geociências USP, Professora Associada UFMG - menegase@yahoo.com.br

³ Mestre em Engenharia Civil, Tecnologista CDTN - pmf@cdtn.br

⁴ Doutor em Mineralogia/Geologia pelo Johannes Gutenberg Universität, Alemanha, Pesquisador do CDTN - pchr@cdtn.br

⁵ Doutorando em Geologia Econômica UFMG - smelos@gmail.com

dolines and six interfluvial areas, objecting its hydrological monitoring. Precipitation, changes in phreatic and surface accumulated water levels were measured in two dolines; in the interfluvial areas were measured precipitation and water accumulated in field infiltrometers. Preliminary results allow to infer the important role of dolines in aquifer recharge by localized type, which are favoured by the conditions of intense and concentrated rainfall, characteristic of the region, promoting the high runoff in the depression. In the interfluvial areas it is proven that no direct infiltration occurs.

Keywords: dolines – localized recharge - semi-arid

1 - INTRODUÇÃO

Para alcançar o reservatório de água subterrânea, a água de recarga pode fluir no sentido descendente, ascendente ou lateral. Esta água pode ter sua origem na precipitação, rios, fluxos inter-aquíferos e outras superfícies (Lerner, 1997). A recarga artificial é também freqüente, com fontes na urbanização e irrigação da agricultura (Lerner, 1997; Simmers, 1997).

A recarga varia espacialmente e é controlada por fatores como a precipitação e/ou outras fontes de água, a geologia, o solo, o relevo e a condição da água subterrânea. Pelo fato da recarga ser um processo não-linear, não é possível utilizar os valores médios de cada fator de controle para obter uma recarga média em grande área. A recarga deve ser calculada separadamente para cada zona homogênea, com os valores variando espacialmente. Esse zoneamento é essencial para estudos de modelagem de águas subterrâneas (Lerner, 1997). Esse autor sugeriu três distinções de recarga com base na rota tomada pela água. Essas diferenciações, entretanto, são feitas com base em processos e por praticidade, os quais não podem ser rigidamente cumpridos na prática.

A *recarga direta* é a que ocorre como um processo difuso no ponto de impacto da chuva que se infiltra e se torna diretamente recarga. A *recarga localizada* se refere àquela parcela de água que escoia superficialmente do ponto de impacto e se torna água de recarga em zonas específicas como riachos e depressões. A terceira trata da *recarga indireta* também envolve a concentração de água, geralmente em rios temporários ou perenes, distinguindo-se da localizada porque os cursos de água são suficientemente grandes para serem contados, mapeados e avaliados.

A recarga localizada nesse contexto é uma categoria intermediária entre a recarga direta e indireta. Esse tipo de recarga freqüentemente é maior em regiões áridas e semi-áridas (Simmers, 1997). A partir da década de 1990 essa categoria tem recebido atenção considerável com um número cada vez maior de estudos de verificação da importância do processo e na tentativa de quantificar a sua contribuição em relação à massa de águas subterrâneas (Lerner, 1997). A literatura também deixa muito claro que os modelos locais de recarga das águas subterrâneas que ignorar a possibilidade da *recarga localizada* pode ser muito enganador conforme pode ser encontrado em

Stephens (1994) *apud* Lerner (1997). Gee & Hillel (1988) *apud* Lerner (1997) visualizam recarga localizadas como ocorrendo em três escalas espaciais, a saber: i) Vias de fluxo de micro-escala, de vários centímetros, formados por fissuras de retração e contração, raízes e tocas de animais; ii) Vias de fluxo de meso-escala, com vários metros, causadas por variações na topografia ou na litologia local e iii) Vias de fluxo de macro-escala, chegando a cem ou mais metros, causada por elementos paisagísticos importantes, tais como dolinas, sumidouros, *playas* ou formas erosivas.

Para que ocorra a recarga a quantidade de água que entra no sistema deve ser superior àquela que é perdida. Entretanto, em regiões áridas a taxa de evapotranspiração supera a taxa de precipitação nos cálculos do balanço hídrico, dificultando a recarga direta do aquífero.

Porém, estudos mostram que mesmo com essas condições adversas é possível ocorrer algum tipo de recarga subterrânea. Isso porque o ambiente árido não é homogêneo, existindo fortes indícios de significativa variação espacial e temporal das condições de precipitação e infiltração. De acordo com Gee & Hillel, 1988 *apud* Simmers *et al*, 1997, a maior parte da recarga em regiões áridas é episódica, ocorrendo durante curtos períodos de tempo e em áreas restritas.

Por isso, em regiões áridas o estudo da recarga localizada é de fundamental importância e a sua investigação demanda um conhecimento em escala detalhada, tendo-se em consideração que os feitos da topografia, solo, clima e vegetação são bastante determinantes.

O uso da água subterrânea é de importância fundamental para satisfazer as necessidades da expansão urbana, industrial e agrícola da água em regiões (semi-) áridas. Quantificar a taxa real de recarga subterrânea é, portanto, fundamental para uma gestão eficiente dos recursos de águas subterrâneas nessas regiões, onde tais recursos são freqüentemente a chave para o desenvolvimento econômico (Simmers *et al*, 1997). Entretanto, é comum encontrar-se nesse ambiente climático um comprometimento da potabilidade das águas, sobretudo a subterrânea, principalmente pela elevada salinização ou alguma outra anomalia de origem natural em sua composição.

A área desse estudo se localiza no município de Verdelândia, norte de Minas Gerais e se enquadra no domínio semi-árido. Localizada sobre um relevo cárstico desenvolvido na seqüência carbonática-pelítica do Grupo Bambuí, a região é fortemente marcada pela presença das dolinas, cujo termo foi utilizado por Cvijic (1893) *apud* Ford & Williams, (1989) se referindo às depressões fechadas circulares ou elípticas que se formam na superfície, em função da dissolução de rochas solúveis, normalmente em subsuperfície. Podem atingir de poucos a centenas de metros de profundidade e várias centenas de metros de diâmetro (Sweeting, 1972; Ford & Williams, 1989; Pilló, 1998).

A baixa pluviosidade da região de Verdelândia (789,8 mm ano), conjugada com temperaturas elevadas - média anual de 25°C e grande insolação contribui para uma condição de *déficit* hídrico

significativo de 594,9 mm ao ano (Silva, *et al.* 2008). A região se caracteriza por apresentar dois períodos climáticos marcantes - um chuvoso, de novembro a abril e um seco, praticamente sem chuvas, de maio a outubro (Velásquez *et al.*,2009), sendo comum precipitações de grande intensidade, resultando em elevados volumes de escoamentos superficiais.

Pressupõe-se, assim, que uma das formas de recarga mais importantes seria do tipo localizada, através do grande número de dolinas que marcam a região, garantindo a continuidade do aporte do recurso hídrico subterrâneo. Comprovar tal conhecimento, por sua vez, implicaria em medidas importantes na manutenção das condições de infiltração através destas feições de absorção cárstica.

Na região de Verdelândia a água subterrânea é largamente utilizada. Localmente, porém, a sua qualidade compromete a potabilidade devido à elevada salinidade e ou concentração de fluoreto acima de 1,5mg/L (Brasil, 2004). Estudos geológico, hidrogeológico e hidrogeoquímico comprovaram que tais anomalias de fluoreto estão relacionadas à dissolução da fluorita que ocorre principalmente nos veios calcícticos dos calcários do Grupo Bambuí; e também que as concentrações mais elevadas ocorrem na porção semi-árida, com registro de maior concentração regional - 11 mg/L no município de Verdelândia (Velásquez *et al.* 2003, 2006, 2007a, 2007b).

Os resultados dessas pesquisas passadas suscitaram o questionamento: além da dissolução da fluorita, quais e como outros processos podem contribuir para as maiores anomalias de flúor nesse contexto semi-árido? A realização desse estudo busca tal compreensão calcada no entendimento de que é necessário se conhecer o fluxo da água subterrânea desde a infiltração em superfície, ou seja, como os processos de recarga sob o clima semi-árido, que, em conjunto com os estudos geoquímicos dos solos e da qualidade da água lixiviada contribuem para a as elevadas concentrações de flúor no aquífero cárstico-fissural.

2 - OBJETIVOS

É objetivo principal deste trabalho caracterizar, qualitativa e quantitativamente, as recargas aquíferas direta e localizada em área sob clima semi-árido, a partir das feições geológico-geomorfológicas preferenciais de entrada de água para o sistema aquífero cárstico-fissural no município de Verdelândia, Minas Gerais.

3 - CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ÁREA

3.1 – Localização

A região de estudos se localiza nos municípios de Verdelândia e Varzelândia cerca de 600 km, a norte de Belo Horizonte, hidrograficamente situada no médio rio São Francisco (Figura 1), na porção média da sub-bacia do rio Verde Grande.

3.2 Aspectos geomorfológicos

A área de estudo encontra-se dentro do contexto da chamada Depressão Sanfranciscana, caracterizada por apresentar uma grande superfície aplainada e dissecada com cotas em torno de 500 metros, desenvolvida sobre os metassedimentos pelíticos e carbonáticos do Grupo Bambuí (Boaventura, *et al*, 1977). Dentre as feições mais comuns estão as formas onduladas, recobertas por depósitos de superfície, de origem coluvionar e aluvionar.

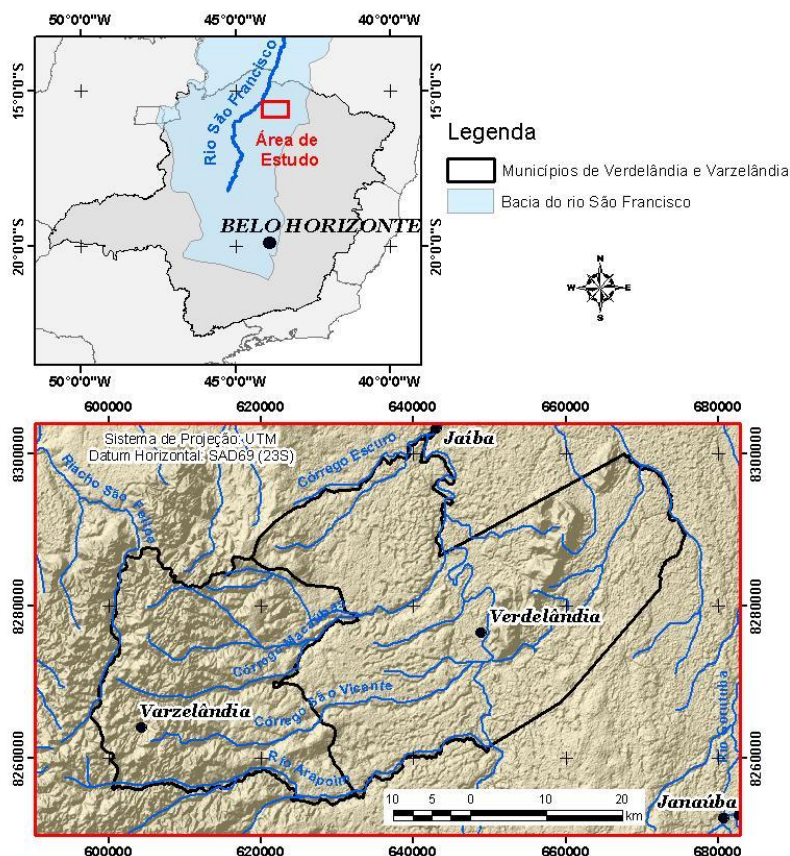


Figura 1 – Localização da área de estudo na bacia do São Francisco e no estado de Minas Gerais

Os depósitos recentes se encontram sobrepostos às rochas pelíticas e principalmente calcárias da Formação Lagoa do Jacaré. E é no contexto geológico sobrejacente que se formam as depressões poligonais fechadas, como dolinas, uvalas e poljés. As dolinas observadas dentro desse contexto geomorfológico são bastante evoluídas e em sua maioria encontram-se entulhadas por sedimentos finos, apesar de, em menor escala ocorrerem dolinas de abatimento. Dessa forma, extensos campos de dolinas foram formados onde as condições geológicas eram mais favoráveis e isso implicou no baixo desenvolvimento das redes de drenagens.

3.3 - Aspectos climáticos

Patrus *et al.* (2001), adotando a classificação de Köppen, classifica a região como do tipo Aw, tropical chuvoso, quente e úmido, com inverno seco, apresentando temperatura média do mês mais frio superior a 18°C, e verão chuvoso. Já adotando os critérios de Nimer (1979), os mesmos

autores o classificam como tropical quente semi-úmido inverno ameno e verão sempre quente e muito longo, com um período seco de longa duração.

A precipitação média anual é de 789,8 mm, concentradas principalmente entre os períodos de novembro a março e com índices muito baixos para o período entre abril e setembro e raramente chovendo entre maio e setembro, de acordo com a estação meteorológica de Janaúba, situada a cerca 40 quilômetros da área de estudo. O Balanço Hídrico mensal normal de Thornthwaite-Matter (1954) mostra déficit hídrico de 594,9 mm/ano, não havendo Excedente Hídrico e Evapotranspiração Potencial estimada em 1384,7mm, para o período de 1996 a 2006, de acordo com os dados meteorológicos fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. A temperatura média compensada anual é de 25°C, sendo julho o mês mais frio, com média de 22,5°C e outubro o mês mais quente, com média de 26,9 °C.

3.4 - Geologia e Hidrogeologia

A estratigrafia da área de estudos é constituída de uma seqüência de rochas pelito-carbonáticas e siliclásticas neoproterozóicas do Grupo Bambuí, de origem marinha e por depósitos Tércio-Quaternários elúvio-colúvio-aluvionares (Figura 2). As unidades estão estruturadas em camadas subhorizontais e pouco deformadas.

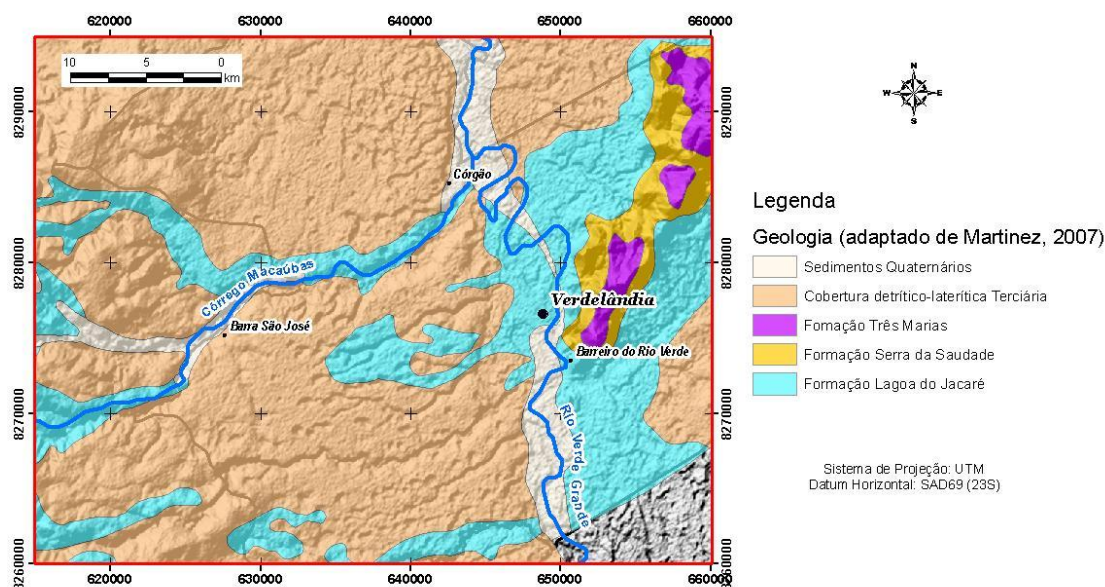


Figura 2 - Mapa geológico simplificado da área de estudo sobre relevosombreado, adaptado de Martínez (2007)

As rochas do Grupo Bambuí têm como unidades aflorantes: a Formação Lagoa do Jacaré, constituída por intercalações repetidas de calcarenitos e calcirruditos, além de siltitos e margas; a Formação Serra da Saudade, composta por siltitos, metassiltos e argilitos; a Formação Três Marias, por arcósios finos a médios, arenitos calcíferos, feldspáticos, siltitos e mais raramente argilitos (Martínez, 2007). Dentre essas, a unidades de ampla ocorrência é a Formação Lagoa do Jacaré. As demais são restritas à porção leste, na Serra da Jaíba.

As coberturas detríticas Tércio-Quaternárias são de grande abrangência espacial, recobrando grande parte das rochas pelito-carbonáticas. São constituídas de sedimentos inconsolidados, como aluviões antigos, colúvios e principalmente material eluviado das rochas do Grupo Bambuí. Depósitos coluvionares especialmente sob forma de depósitos de tálus são constatados próximos as serras da região e depósitos aluvionares ao longo dos vales.

Assim, o pacote de rochas pelito-carbonáticas do Grupo Bambuí e os sedimentos das coberturas cenozóicas permitem definir dois sistemas aquíferos: o inferior, cárstico-fissural, e o superior, granular. O sistema cárstico-fissural na área é principalmente representado pela seqüência de rochas carbonáticas com intercalações centimétricas a métricas de rochas pelíticas da Formação Lagoa do Jacaré e constitui a principal fonte de abastecimento de água subterrânea da região, captada por poços tubulares. A Formação Serra da Saudade, sobreposta à anterior e aflorante a leste da área, funciona como um aquífero com baixo potencial hídrico. O fluxo de água no aquífero Lagoa do Jacaré ocorre preferencialmente nas direções NE e NW, alcançando o leito do Rio Verde Grande, principal exutório na área. Contudo, podem ocorrer fluxos em outras direções, influenciados por condicionantes estruturais. A recarga nesse sistema aquífero deve ser predominantemente de dois tipos: localizada nas dolinas, e diretas, pela infiltração da precipitação nas fraturas abertas pela dissolução cárstica das rochas aflorantes.

O sistema granular, constituído das coberturas cenozóicas, adquire importância como recurso hídrico em porções restritas ao longo dos vales dos rios perenes (Verde Grande) e efêmeros, em que a água é captada para uso doméstico por meio de cisternas. O principal tipo de recarga do sistema granular é do tipo indireta, ocorrendo nos aluviões e terraços aluvionares.

4 - MATERIAIS E MÉTODOS

Os métodos dos estudos de recarga descritos a seguir partiram do pressuposto de que, na região de Verdelândia, a recarga direta da precipitação é insignificante, como se verá adiante, predominando a recarga localizada. A investigação de ambos os pressupostos envolveu a instalação de estações de monitoramento hidrológico para realização dos balanços hídricos locais para a estimativa da recarga. Ressalta-se que parte do estudo da recarga localizada se encontra ainda em andamento. A instalação dessas estações foi precedida de estudos de caracterização climática, geomorfológica, geológica e pedológica para seleção dos locais apropriados aos objetivos propostos.

4.1 - Estudo da Recarga direta

As localidades selecionadas para a instalação das estações eram topos de elevação, morfologia plana, e em solos que estivessem no estado o mais preservado possível de modo a assegurar ao

máximo os eventuais fenômenos de infiltração natural. Duas estações foram instaladas em cada tipo pedológico predominante na área de estudos - cambissolo, latossolo vermelho-amarelo e latossolo vermelho, porém apenas três estações eram completas, isto é, constavam de infiltrômetros e pluviógrafos; nas demais, apenas infiltrômetros (Tabela 1 e Figura 3).

Tabela 1 - Localização das estações de monitoramento hidrológico para infiltração direta

<i>Estação</i>	<i>Fazenda</i>	<i>Coordenadas UTM</i>		<i>Altimetria interpolada</i>	<i>Tipo de estação</i>	<i>Tipo de solo</i>
P1	Domina	644347	8287306	496,4	Completa	Cambissolo
P2	São José	643166	8274004	511,1	Completa	Latossolo vermelho-amarelo
P3	Boi Pintado	654000	8269441	504,0	Parcial	Cambissolo
P4	São Geraldo	643526	8281988	470,2	Parcial	Latossolo vermelho-amarelo
P5	Arapuá	627452	8267139	563,8	Completa	Latossolo vermelho
P6	Barreiro Azul	617411	8277354	606,7	Parcial	Latossolo vermelho

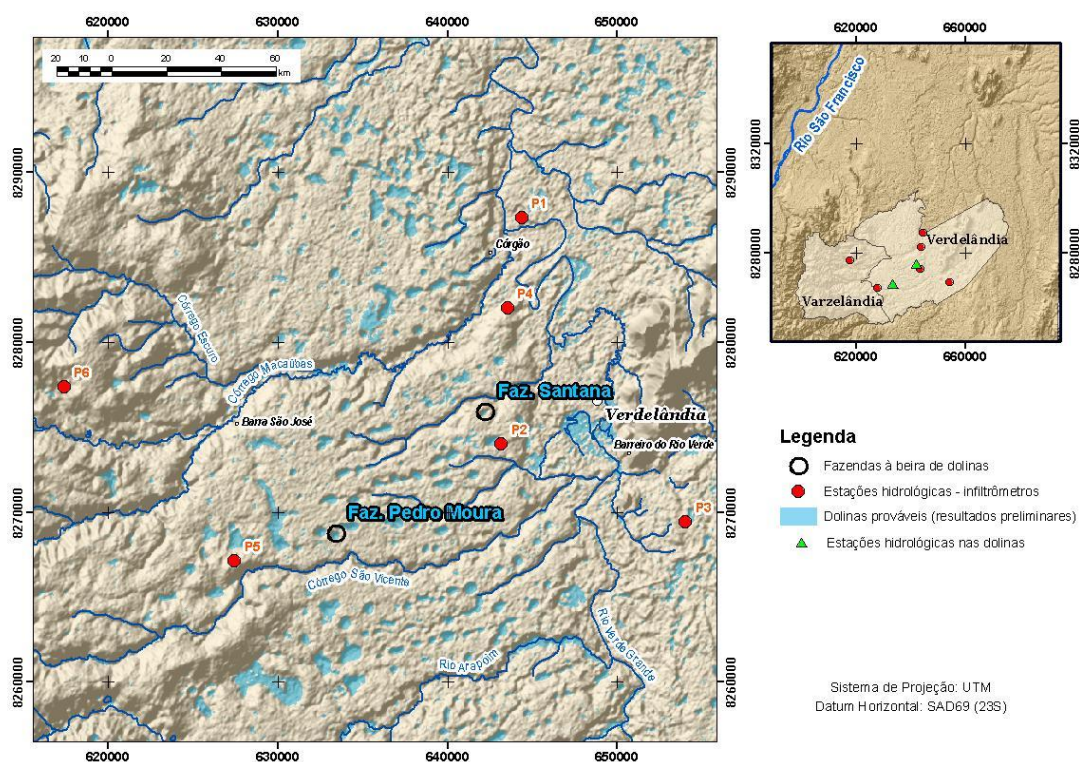


Figura 3 – Estações hidrológicas para os estudos da recarga direta com infiltrômetros e recarga localizada em duas dolinas (destaque para a marcante presença de dolinas existentes, interpretadas por geoprocessamento)

Cada infiltrômetro consistiu de uma trincheira de 2m x 1,5m com profundidade de até 2,0m, dependendo do perfil pedológico em cada local da estação (Figura 4). Instalou-se um par de gavetas de PVC diametralmente oposto, adentrando-as nas paredes de maior comprimento da trincheira através de um nicho escavado. Antes, porém, o solo escavado do nicho foi introduzido no interior das gavetas e essa foi revestida com manta geotêxtil para evitar entupimentos por argila e garantir a infiltração da água. Cada gaveta teve a função de coletar a água infiltrada no solo abaixo da zona de transpiração das raízes, e transferi-la para um tubo reservatório de PVCØ100mm instalado à

profundidade de até 5,5m da superfície do solo. A conexão da gaveta com seu respectivo tubo reservatório foi feita por meio de mangueira flexível. (Figura 5).

A necessidade de duas gavetas e dois reservatórios foi para separar os tipos de monitoramento, quais foram: a quantidade e a qualidade da água infiltrada. Desse modo, num reservatório seria medida a quantidade da água infiltrada por meio do registro da oscilação do nível d'água e no outro a água seria coletada para análise física e química. Ao todo, foram abertas, então, 6 trincheiras, e instalados 12 tubos reservatórios e 12 gavetas coletoras.

A estação foi concluída com a aterragem da trincheira, proteções nos segmentos visíveis dos tubos reservatórios, instalação de suportes para a instalação de equipamentos - pluviógrafo, sensor de pressão de água e sistema automático de aquisição de dados - *data logger* (Figura 5).

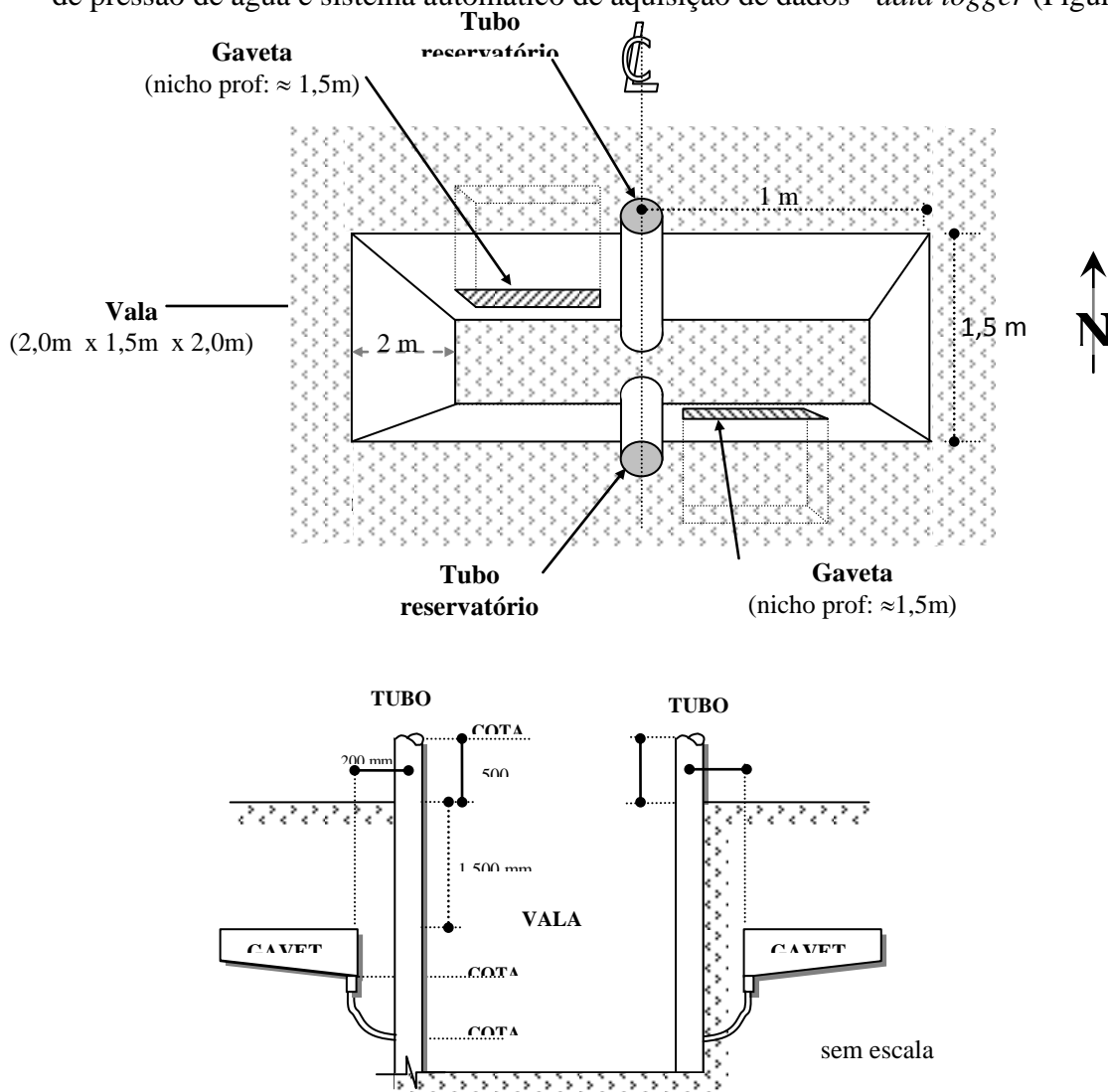


Figura 4 – Esquema de instalação dos infiltrômetros



Figura 5 –Instalação completa de estação com infiltrômetros de gaveta. À direita detalhe da gaveta com tubo reservatório (Autor: Peter M. Fleming, 2007)

Amostras de solo foram coletadas em duas etapas: i) durante a perfuração do solo para a instalação dos tubos reservatórios a até 6m de profundidade e, ii) após a escavação das trincheiras. Durante esse procedimento de perfuração e escavação, foram também registradas as características tácteis e visuais dos solos e os horizontes nos perfis de solo.

O balanço hídrico foi realizado segundo Thornthwaite & Mather (1955), utilizando-se valores de temperaturas da estação meteorológica mais próxima da área, a de Janaúba, distante 40km e empregando-se o valor de 100mm para a Capacidade de Água Disponível – CAD.

Esses dados se referem ao período de nov/2007 a out/2008, disponibilizados pelo INMET. As informações de pluviosidade utilizadas foram as dos três pluviógrafos instalados na região de Verdelândia e Varzelândia, nas fazendas D. Domina, S. José e Arapuá.

Procedeu-se a uma percolação artificial vertical de água sobre uma das gavetas de contenção do infiltrômetro (P1), visando testar o funcionamento do sistema instalado. Para tanto, foi utilizado um segmento de tubo de PVC diretamente sobre a projeção da gaveta e um sistema controlador de entrada de água constituído por bóia e tambor (Figura 6). O controle da entrada de água no infiltrômetro foi realizado medindo-se a altura de água no reservatório por meio de medidor elétrico de nível d'água. O cálculo da variação do nível de água no interior do tambor ao longo do tempo forneceu o volume de água fornecido.



Figura 6 - (A) Esquema de infiltração artificial na estação P1 Faz. D. Domina. (B) Detalhes da bóia controladora de entrada de água e bulbo de umidade. (Autor: Peter M.F., 2008)

4.2 - Estudo da Recarga Localizada

Dentre as feições geomorfológicas de absorção da água mais frequentes que controlam a recarga em terrenos cársticos, como sumidouros, dolinas, fraturas alargadas pela dissolução química em afloramentos, as dolinas com preenchimento de fundo foram contempladas, a despeito da recarga localizada também se processar em fraturas abertas dos lajedos calcários aflorantes nos fundos de várias dolinas na região.

Conforme mencionado, encontra-se em ação um monitoramento hidrológico de duas dolinas com preenchimento de fundo. Segue a descrição: dos métodos de estudos prévios efetuados visando a seleção das mesmas; métodos de caracterização física e pedológica realizada e em execução no campo; dos equipamentos instalados no campo e, dos pressupostos dos elementos hidrológicos do sistema considerado (dolina) para a resolução da equação do balanço hídrico e estimativa da recarga.

A - Seleção morfométrica, espacial e geoestatística das dolinas - Foram selecionadas dolinas estatisticamente representativas da área de estudos, com relação às características morfométricas e pedológicas. A técnica de identificação semi-automática de dolinas partiu da geração das curvas de nível com base nos dados do SRTM (90m, interpolados para 20m) e posterior conversão para polígonos, seguindo-se diversos procedimentos em geoprocessamento (ArcGis 9.2® e Surfer 8®) diferenciando depressões e elevações; as depressões compõem o grupo de polígonos prováveis de dolinas (Figura 3).

Os critérios morfométricos, em ordem decrescente de prioridade foram: dimensão ($<500.000\text{m}^2$) – maior circularidade – evidência de variação sazonal da umidade (observada por imagens de satélite de épocas úmidas e de estiagem) - mais íngreme - mais profunda. Pedologicamente, selecionaram-se as dolinas com fundo preenchido e dentre as possibilidades, duas foram eleitas para objeto deste estudo após aferição e reconhecimento em campo aqui denominadas: Fazenda Santana e Fazenda Pedro Moura, nomes correspondentes aos locais próximos de ocorrência das mesmas (Figura 3), com 350.000m^2 e 460.000m^2 respectivamente.

B - Levantamento topográfico – A topografia das dolinas é relevante para os estudos de escoamento superficial, no cálculo da variação volumétrica no seu fundo.

Os parâmetros considerados para a seleção das dolinas foram: declividade, profundidade, circularidade, e os de maior peso foram o tamanho e a variação sazonal da umidade. A técnica de identificação semi-automática de dolinas parte da geração das curvas de nível com base nos dados do SRTM (90m, interpolados para 20m) e posterior conversão para polígonos, seguindo-se diversos procedimentos em geoprocessamento diferenciando depressões e elevações; as depressões compõem o grupo de polígonos prováveis de dolinas.

C - Pedologia - Para se compreender a variabilidade espacial das propriedades físicas dos solos nas dolinas selecionadas, ambas foram divididas em baixa, média e alta vertente e em cada uma destas áreas abriu-se uma trincheira de 2m de profundidade para caracterização do perfil pedológico do solo por análise tátil-visual conforme Santos (2005).

Amostragem de solos para análises texturais e químicas dos solos foram também realizadas em ambas as dolinas: nas paredes das trincheiras (a cada variação do horizonte pedológico), ao longo da perfuração dos poços de monitoramento do nível de água (a cada 20cm a até 2m de profundidade e a cada 50cm a até 6,0m de profundidade), e em furos de sondagem realizados ao longo das vertentes com esta finalidade, que variaram de 2 a 4 metros de profundidade.

Ao todo, foram tomadas 184 amostras de solos na Fazenda Santana e 35 na Fazenda Pedro Moura. Desse total, 52 foram selecionadas, sendo 26 de cada uma das dolinas para análises físicas e químicas. Os resultados analíticos contribuirão para melhor compreensão do comportamento dos solos frente à percolação da água pluvial, porém não são objeto de análise no presente trabalho.

D – Permeabilidade - A permeabilidade do solo das dolinas é um fator determinante no estudo da infiltração, uma vez que ela controla o tempo de infiltração nos escassos dias de excedente hídrico em climas de elevada evapotranspiração, como no presente caso. Prevê-se o estudo da permeabilidade saturada por meio de técnicas de campo e laboratório. No primeiro caso, por meio do uso do Permeâmetro Guelph (Costa & Nishiyama, 2007) e do infiltrômetro de anéis duplos, e no segundo caso usando-se amostras indeformadas.

E – Estações de monitoramento hidrológico - Para se obterem os valores dos elementos climáticos atuantes em cada dolina e suas resultantes, foram instaladas duas estações de monitoramento hidrológico, tendo-se colocado em operação a seguinte instrumentação: i) Pluviógrafo; ii) Poço de monitoramento instalado o mais próximo possível da zona alagada, com medição automática do nível d'água, usando-se um *diver* e profundidade de 6,0m; iv) Medição, da variação do nível de água do lago, utilizando *diver* - apenas na dolina Faz Pedro Moura (Figura 7).



Figura 7 – Estações de monitoramento hidrológico nas dolinas das Fazendas Santana (meio) e Pedro Moura (dir.)

F - Balanço Hídrico - O balanço hídrico nesse estudo considera as dolinas selecionadas como um sistema fechado, e, sendo assim, a água que se perde desse sistema deverá corresponder à mesma quantidade que é ganha, ou seja, o somatório de entrada e saída é nulo.

Segundo o modelo de recarga proposto para as dolinas na área de estudos, a recarga se daria somente no fundo da depressão a partir de onde ocorre a concentração da água pluvial diretamente da precipitação direta e do escoamento superficial das vertentes.

Segue a descrição dos elementos da equação do balanço hídrico, considerados:

Parâmetros de entrada:

- Precipitação: a precipitação direta corresponde à soma dos volumes de água incidente diretamente sobre o espelho d'água (Pd) e do Escoamento Superficial das vertentes (R).
- Escoamento Superficial ou *Runnof* (R), a partir da variação positiva da altura da lâmina d'água (monitorada com *diver* no fundo da dolina), em cada evento de precipitação. É esperado chegar-se a um coeficiente médio de escoamento superficial na dolina que consta desse instrumento (Faz. Pedro Moura). Na outra dolina R é estimado por meio de método empírico.

Parâmetros de saída:

- Evapotranspiração Real (ETR), estimada para a porção das vertentes da dolina, estimada por Thornthwaite & Mather (1955) e comparada com Penman (1948): evaporação da lâmina de água (Ev), estimada por cálculos empíricos e ou medida indiretamente a partir da variação negativa do volume de água na depressão, em que parte evapora e parte se infiltra efetivamente a ser medido no poço de monitoramento.

Variação no armazenamento:

- Recarga no aquífero (I), medida no poço de monitoramento instalado. É esperado que os resultados obtidos solucionem a equação geral do balanço hídrico para as dolinas em estudo:

$$P = ETR + Ev + \Delta S \quad \text{Onde:}$$

P = Precipitação; ETR = Evapotranspiração da área; Ev = Evaporação direta do lago; ΔS = Variação no armazenamento, correspondente à recarga do aquífero subjacente (I) ao fundo da dolina e medido no piezômetro.

Os excedentes hídricos calculados devem corresponder à soma do volume de água infiltrada no aquífero (I), medido no piezômetro, e do volume de água escoado superficialmente para dentro da dolina (R). Os parâmetros de entrada são a precipitação, temperatura e latitude, enquanto os de saída são a evapotranspiração potencial e real, *déficit* hídrico, excedente hídrico e variação de armazenamento. Os dados de temperatura do ar são os da Estação Meteorológica de Mocambinho em Jaíba, localizada a cerca de 40km do local em questão.

5 - RESULTADOS

5.1 - Estudo da Recarga Direta

Embora o monitoramento da recarga direta esteja em atividade até 2011, são apresentados os resultados do monitoramento compreendido entre 1º de nov/2007 e 31 de out/2008.

A partir dos valores de precipitação das três estações pluviográficas instaladas constatou-se que (Tabela 2): i) todas as estações ficaram abaixo de 800mm, valor médio de referência para a região; ii) ocorreram escassos dias com chuva; iii) houve presença de eventos de grande intensidade (>50 mm/dia), média de 7,3% dos dias de chuva, que respondem por uma média de 36% do precipitado total anual. E ainda, cerca de 23% dos dias de chuva correspondentes a precipitações acima de 20mm, são responsáveis pela média de 75% da precipitação total anual; iii) ocorreram dois períodos distintos, sendo um chuvoso, de novembro a abril, e outro seco, praticamente sem chuvas, de maio a outubro.

Assim, o maior volume de chuvas na área se precipita de forma intensa, resultando em elevados escoamentos superficiais em detrimento da infiltração. O volume de chuvas favoráveis à infiltração (<20 mm/dia) que incide em 77% dos dias não é suficiente para repor o elevado *déficit* hídrico, comprometendo a recarga direta dos aquíferos granular e/ou cárstico-fissural por meio da infiltração direta que percola o solo, como se verá a seguir. Esse dado corrobora o pressuposto de que a recarga principal é localizada, isto é, ocorre por infiltração direta em fraturas e fendas de dissolução em maciços calcários expostos ou fundos de dolinas.

Tabela 2 - Totais de dias e de volume de chuva diária nas estações de monitoramento no período nov/2007 - out/2008

<i>Precipitação diária (mm/dia)</i>	<i>P1 -FAZ DOMINA</i>		<i>P2 -FAZ S JOSE</i>		<i>P5 FAZ ARAPUÁ</i>	
	<i>dias de chuva</i>		<i>dias de chuva</i>		<i>dias de chuva</i>	
$P < 5$	27	49%	34	65%	34	52%
$5 \leq P < 10$	9	16%	4	8%	7	11%
$10 \leq P < 20$	6	11%	2	4%	10	15%
$20 \leq P < 50$	9	16%	7	13%	11	17%
$50 \leq P$	4	7%	5	10%	3	5%
Total	55 dias		52 dias		65 dias	
	<i>P intervalar (mm)</i>		<i>P intervalar (mm)</i>		<i>P intervalar (mm)</i>	
$P < 5$	36,00	5%	38,50	6%	59,25	8%
$5 \leq P < 10$	55,50	8%	26,25	4%	45,75	6%
$10 \leq P < 20$	96,25	14%	31,00	5%	147,75	19%
$20 \leq P < 50$	278,25	39%	253,50	37%	321,00	41%
$50 \leq P$	244,50	34%	338,75	49%	203,25	26%
Total	710,50mm		688,00mm		777,00mm	

O balanço hídrico climático realizado para todas as três estações mostra que não ocorre excedente suficiente de água para contribuir para a recarga de aquíferos (Tabela 3). Apesar do

excedente observado por um mês na estação P2, por influência de chuvas intensas ocorridas em um mês, registrou-se ao longo do ano um *déficit* de 722,6mm. Verificou-se que ao longo do ano ocorreu *déficit* em 10 dos 12 meses analisados, tendo o suprimento de chuva de dois meses servido apenas à reposição da CAD.

Tabela 3 – Resultado do balanço hídrico climático

Estação	P	ETP	ETR	DEF	EXC
P1 – D. Domina	710,0	1421,9	710,5	711,3	0,0
P2 – São José	776,0	1422,0	699,3	722,6	76,0
P5 - Arapuá	777,0	1422,0	777,0	645,0	0,0

Em todo o período monitorado não se observou qualquer resposta natural nos infiltrômetros. Esse comportamento é coerente com os resultados do balanço hídrico realizado para o período considerado, no qual não se observou excedente hídrico, exceto o ocorrido em dezembro de 2007 na Faz. São José, porém, insuficiente para promover a recarga dos aquíferos, podendo-se inferir que a maior parte desse excedente constituiu o escoamento superficial. Assim, todo o aporte de água no meio fica restrito às camadas mais superiores do solo, já que não alcançam os valores de máximos da CAD e, por conseguinte, não ocorre o excedente que contribuiria para a recarga dos aquíferos.

Para verificação do funcionamento dos infiltrômetros, foram realizados dois testes de infiltração na estação P2, tendo-se simulado uma precipitação equivalente a 1.529mm, muito acima da média regional de 800mm, e no segundo, de 812mm, com duração de 354 e 190 min., respectivamente. Em nenhum caso os infiltrômetros acusaram a entrada de água efetiva nos seus reservatórios, tendo-se visualizado apenas uma frente de umedecimento na parede da trincheira até a profundidade da gaveta - 150cm, e a 120cm, respectivamente. Posteriormente, procedeu-se, na estação P1, à percolação vertical de água sobre o infiltrômetro à carga variável. O tempo de resposta à infiltração foi de 15 dias para percolação até a profundidade da caixa do infiltrômetro - 1,5m, o que confere uma permeabilidade média saturada do solo da ordem de 10^{-4} cm/s.

Desse modo, constatou-se a boa eficiência do sistema de infiltrômetros instalados e se demonstrou que, nas porções topograficamente mais elevadas da área, a ausência de registros de águas naturalmente infiltradas no solo não chega a constituir recarga para os aquíferos freáticos e nem para os cárstico-fissurais, devido ao elevado *déficit* hídrico local e baixos excedentes, conforme resultados do balanço hídrico climático.

5.2 - Estudo da Recarga Localizada nas dolinas

Para o estudo de recarga localizada, realizada nas dolinas, são apresentados apenas resultados preliminares, uma vez que o monitoramento encontra-se em operação.

5.2.1 – Caracterização pedológica

As trincheiras escavadas nas dolinas das Fazendas Santana e Pedro Moura permitiram constatar diferenças marcantes de solo de Baixa vertente das dolinas para a Média e a Alta vertente.

Na Faz. Santana a trincheira em Baixa vertente a 20 metros da lagoa mostra um solo acinzentado e bastante rachado, identificado em campo como Vertissolo, o qual é caracterizado por apresentar um horizonte A sob um horizonte Cv, ou seja, com características verticais por conta do processo de inversão causada pelas rachaduras da superfície, devido à presença de argila 2:1 (Figura 8). O teor de argila é visivelmente bastante elevado, a cor tende aos tons de cinza e a presença de mosqueado indica que a formação desse solo deu-se em condições de constante alagamento, com presença significativa de flutuações do nível d'água durante o ano e recebendo possivelmente argila das áreas vizinhas à montante. Essa classe de solo é encontrada principalmente em regiões de baixa precipitação e lixiviação e não é facilmente permeável à água.



Figura 8 - Vertissolos em Baixa vertente - fundo da dolina da Faz. Santana. Detalhe das rachaduras na superfície do solo (esq.) e na trincheira (dir.) (Autor: Letícia Braga, 2009).

Em Média e Alta vertente, as trincheiras escavadas respectivamente a 50m e 150m da área da lagoa, exibiram o Latossolo Amarelo, com presença de horizontes A e B muito permeável e com alta capacidade de armazenamento (Figura 9).



Figura 9 – Latossolo Amarelo em Média vertente nas Faz.Santana (esq.) e Pedro Moura (dir.) (Autor: Letícia B., 2009)

A dolina Fazenda Pedro Moura seguiu o mesmo padrão de classes de solos que a da Fazenda Santana, com algumas particularidades (Figura 9). Os solos em geral apresentaram-se mais arenosos, entretanto não o suficiente para mudar as classes encontradas.

Em Baixa vertente a trincheira a 30m da área da lagoa, exibe um solo visivelmente acinzentado e igualmente rachado em superfície. Conforme ocorreu na primeira dolina, nessa área também foi encontrado o Vertissolo. Em Média e Alta vertente, as trincheiras escavadas, respectivamente a 100m e 180m da área da lagoa, exibiram Latossolo Amarelo bastante arenoso.

A presença de um solo bastante argiloso no fundo das dolinas e mais arenoso ao longo das vertentes sugere perda da argila desse material a montante e sua deposição a jusante, uma vez que ela é facilmente carregada para as áreas mais baixas, mesmo em áreas com pouca pluviosidade. Isso favorece o represamento de parte da água de escoamento e diretamente da chuva, em forma das lagoas presentes nas duas dolinas estudadas.

Já a presença de um latossolo bastante arenoso e permeável no restante das vertentes das dolinas favoreceria a recarga direta ou o seu posterior escoamento subsuperficial em direção ao fundo da dolina. Entretanto, tal processo necessita ainda ser comprovado.

5.2.2 – Monitoramento Hidrológico

Apresentam-se os primeiros resultados das Estações de Monitoramento Hidrológico instaladas nas dolinas, para investigação do pressuposto da recarga localizada através das dolinas. Na dolina Faz. Santana o monitoramento registrado foi de 22/11/2009 a 10/02/2010 e na Faz. Pedro Moura de 27/12/2009 a 01/01/2010.

É notável a correlação existente entre a precipitação diária e a variação diária no nível de água dos piezômetros em ambas as dolinas, com a maioria dos picos de chuva seguidos por picos de elevação do nível d'água, assim como também é possível notar que nos períodos sem chuva houve diminuição do nível de água (Figura 10).

Do ponto de vista qualitativo, até o atual momento da pesquisa, os dados apresentados apontam para as dolinas preenchidas como feições que estão funcionando como zonas de recarga localizada do aquífero cárstico na região de Verdelândia. Apesar do fundo extremamente argiloso, a presença das gretas observadas nos vertissolos desenvolvem uma permeabilidade secundária no material, promovendo uma infiltração da água acumulada em superfície.

5.3 - CONCLUSÕES

Demonstrou-se através do monitoramento dos infiltrômetros que a recarga direta em áreas de divisores hidrográficos é mínima ou inexistente em virtude do elevado *deficit* hídrico e do comportamento das chuvas, que são intensas e concentradas no ano, favorecendo as recargas dos tipos indireta e localizada. A investigação da recarga localizada a partir monitoramento pluviográfico e piezométrico, cujos equipamentos foram instalados em posição de Baixa vertente de

duas dolinas, mostra uma expressiva correlação entre os episódios das ocorrências das chuvas e as variações positivas do nível de água freática. Tal fato ocorre a despeito desse solo ser extremamente argiloso (vertissolo), o que remete à importância do papel da permeabilidade secundária manifestada pelas gretas assim observadas, características da argila expansiva. Pela recorrência das dolinas na região, certamente tal tipo de recarga é, sem dúvida, relevante.

Os latossolos arenosos das Altas e Médias vertentes confirmam a possibilidade de recarga direta ao longo das vertentes das dolinas e também o favorecimento da formação de lagoas no fundo delas por restituição através de escoamento sub-superficial, o que carece ainda de comprovação.

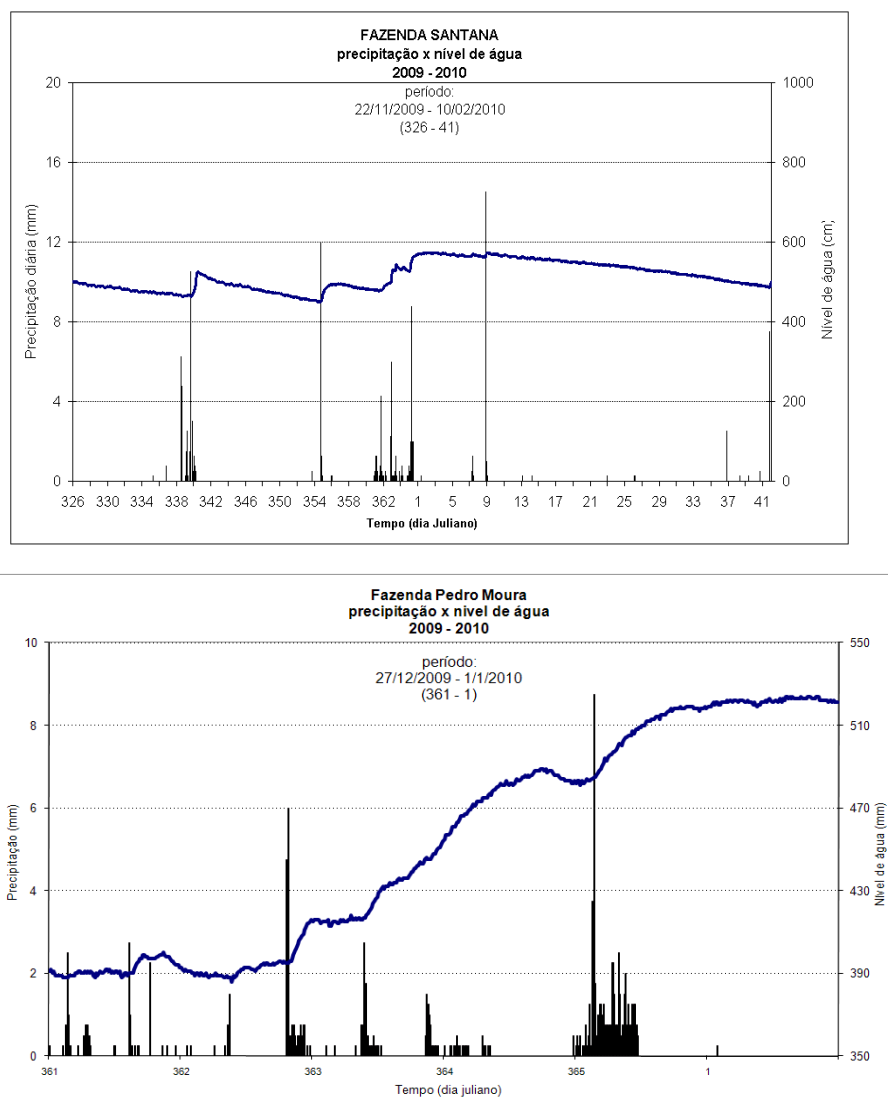


Figura 10: Pluviometria e variação de nível em piezômetros instalados junto às dolinas das Fazendas Santana, (22/11/2009 a 10/02/2010) e Pedro Moura (27/12/2009 a 1/1/2010).

AGRADECIMENTOS

À Fundação do Amparo à Pesquisa no Estado de Minas Gerais (Processo CRA-PPM-00070-08) pelo apoio financeiro e ao Instituto Mineiro de Gestão das Águas – IGAM pela infra estrutura no transporte à área de estudos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOAVENTURA, R.S., Moreira, C.V.R., Boaventura, F.M.C. 1977. Mapa Geomorfológico. Folha Belo Horizonte. Projeto Radar Minas Gerais, 1:500.000, Secretaria de Estado de Ciência e Tecnologia. Instituto de Geociências Aplicadas (IGA).
- BRASIL. Portaria Nº 518 de 25 de março de 2004. Estabelece os Procedimentos e Responsabilidades Relativos ao Controle e Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano e seu Padrão de Potabilidade, e dá Outras Providências. Diário Oficial da União, 26 mar. 2004.
- COSTA, Felipe Provenzale Mariano; Nishiyama, Luiz. Utilização do Permeâmetro Guelph e Penetrômetro de Impacto Em Estudos de Uso e Ocupação dos Solos em Bacias Hidrográficas. Caminhos de Geografia - Revista on Line. ISSN 1678-6343 Disponível em: <http://www.ig.ufu.br/revista/caminhos.html>
- ESRI - Environmental Systems Research Intitute. Inc. - Aplicativo ArcGis(modalidade ArcEditor), versão 9.2.
- FORD, Derek; Williams, Paul. Karst Geomorphology and Hydrology. London: Chapman & Hall 1989.
- GOLDEN SOFTWARE - Aplicativo Surfer, versão 8.0.
- KOBIYAMA, M; Vestena, L, R. Aplicação do Método de PENMAN Modificado no Cálculo da Evapotranspiração Potencial para Quatro Estações Meteorológicas do Estado do Paraná. Revista Ciências Exatas e Naturais, Vol 8, nº1, Jan/Jun 2006.
- LERNER, David N. Geochemical Process, Weathering and Groundwater Recharge in Cathments. Groundwater Recharge. O.M. Seather & P. de Caritat (eds) 1997 Balkema
- Nimer, E., 1979. Climatologia do Brasil. SUPREN/IBGE. Volume 4.
- SILVA, A. B. da. 1995. Água Subterrânea no Carste da Bacia do Rio Verde Grande, Norte de Minas Gerais. Tese para provimento de professor titular. Belo Horizonte: UFMG.97 p.
- PATRUS, M.L.R.A.; Santos, A.C.S. dos; Figueredo, V.L.S.; Matos, A.R.; Menezes, I.C.R. 2001. Parcela Mineira da Bacia do Rio São Francisco: Caracterização Hidroclimática e Avaliação dos Recursos Hídricos de Superfície. In: Pinto, C.P.; Martins-Neto, M.A. (Org.). Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais. Belo Horizonte: SBG-MG. p. 285-326.
- PILÓ, Luís Beethoven. Morfologia Cárstica e Materiais Constituintes: Dinâmica e Evolução da Depressão Poligonal Macacos-Baú - Carste de Lagoa Santa, MG. São Paulo: Departamento de Geografia da Universidade de São Paulo - USP (Tese de Doutorado), 1998.
- PENMAN, H.L. Natural Evaporation From Open Water, Bare Soil and Grass. Proceedings of the Royal Society of London, v.A193, p.120-146, 1948.
- SANTOS, Raphael David dos; Lemos, Raimundo Costa de; Santos, Humberto Gonçalves dos; Ker, João Carlos; Anjos, Lúcia Helena Cunha dos. Embrapa. Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Centro Nacional de Pesquisa de Solos (5ª Edição) 2005
- SILVA, S. M.; Velásquez, L. N. M.; Freitas, A. M.; Pereira, C.; Costa, D. A.; Soares, L. C.; Fantinel, L. M.; Fleming, P. M.; Rodrigues, P. C. H. 2008. Hidroquímica das Águas Subterrâneas e Anomalias de Fluoreto em Região do Semi-árido Mineiro. In: ABAS, Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 15, Natal. Livro de resumo, p. 209.

