Condições de infiltração em solos na região de recarga do sistema aquífero Urucuia no oeste da Bahia sob diferentes condições de usos

Márcia Tereza Pantoja Gaspar¹, José Eloi Guimarães Campos² & André Luiz de Moura Cadamuro³

Resumo Os solos avaliados neste estudo estão inseridos no contexto de ocorrência do Sistema Aquífero Urucuia, localizado no oeste do estado da Bahia. São solos homogêneos do ponto de vista físico e muito importantes para a recarga do aquífero. Os estudos foram realizados em Latossolo vermelho-amarelo de textura média e argilosa e Neossolo quartzarênico empregados, sobretudo, para o plantio de soja, algodão, milho, pastagens e reflorestamento de eucaliptos e pinheiros. O presente estudo avaliou as condições de infiltração desses solos, por meio da execução de uma série de 30 ensaios de infiltração com infiltrômetro de duplo anel e testes tipo *open end hole*, além de alguns ensaios granulométricos, buscando observar uma correlação entre os valores de condutividade hidráulica observados, a composição granulométrica e os tipos de usos do solo na área de ocorrência do aquífero. Os valores de condutividade hidráulica vertical (Kv) dos ensaios realizados na superfície refletem diretamente os variados usos a que os solos são submetidos. Os menores valores, da ordem de grandeza de 10^{-5} a 10^{-6} m/s, foram obtidos em solos destinados a usos como loteamento residencial, pastagem, estradas não pavimentadas e plantações de soja. Já os maiores valores, da ordem de 10^{-4} m/s, foram encontrados em áreas preservadas de cerrado, com ocorrência de Latossolo de textura média e arenosa. Nos resultados obtidos com testes do tipo *open end hole*, que permitem determinar a variação da condutividade hidráulica em diferentes profundidades, os valores de Kv são da ordem de grandeza de 10^{-6} a 10^{-7} m/s. As variações em profundidade são relacionadas principalmente a diferenças na granulometria ao longo do perfil pedológico. Os resultados dos ensaios de infiltração *in situ* mostram que, de acordo com os diferentes tipos de usos dos solos, ocorre significativa diminuição nas condições naturais de infiltração e possivelmente uma conseqüente redução da recarga do Sistema Aquífero Urucuia.

Palavras-chaves: condutividade hidráulica, uso do solo; Sistema Aquífero Urucuia, área de recarga.

Abstract *Infiltration conditions in soils in the recharge region of the Urucuia aquifer system in the west of Bahia under different uses conditions* This study was carried out in order to evaluate the soils that overlay the Urucuia Aquifer System, located in the western portion of Bahia state, Brazil. The soils are represented by homogeneous thick coverage important to the recharge of the aquifer. The studies were developed in reddish-yellow sandy latosol, and quartzarenic neossols, applied to plantation. The study consists of evaluation of the infiltration conditions of these soils, by the execution of 30 field infiltration tests with the double concentric ring method and open-end method, and some grain size assays, looking after a correlation between hydraulic conductivity values, types of uses and grain size composition. The values of vertical hydraulic conductivity (Kv) with concentric rings reflect the soils uses, where the lowest values, of 10^{-5} to 10^{-6} m/s were observed in soils where the main uses are grass, residential area, not-paved road and soy plantation; and the average values in natural soils are about 10^{-4} m/s. The values of Kv resulted from the open-end tests method are lower, of the order of 10^{-6} m/s, with variations in depth, attributed in some cases to the increase of the total amount of clay in the soils profile, to the moisture content and the use that the soils are submitted. The results had shown that the natural conditions of water infiltration are affected by the several intervention features and soil use and occupation, and show that the preservation of reserve areas is important to the recharge processes in long period terms, so that the quality of the aquifer is not compromised in the future.

Keywords: hydraulic conductivity, use of the land, Urucuia Aquifer System, recharge area.

INTRODUÇÃO A infiltração da água é um dos mais importantes processos do ciclo hidrológico, principalmente por ser fundamental para a recarga de aquíferos e por ser afetada pelos usos e manejos a que os solos são submetidos. Sua importância remete-se não apenas

à infiltração da água da chuva nos solos, mas também, ao controle exercido sobre o comportamento de plumas de contaminação na zona vadosa dos aquíferos e sobre a função de regulação das vazões da rede de drenagem superficial.

1 - Programa Pós-Graduação, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil. E-mail: marciatpg@yahoo.com.br

2 - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil. e-mail: eloi@unb.br

3 - Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal, Águas Claras, DF, Brasil. E-mail: andrecadamuro@yahoo.com.br

Após a água alcançar a superfície dos solos, o processo de infiltração é governado em grande parte pela ação gravitacional. A infiltração também é influenciada por outros fatores de ordem natural e antrópica. Os fatores de ordem natural incluem mineralogia, textura, estrutura, umidade inicial, presença de pedregosidade, porosidade e relevo, que são atributos relacionados ao tipo do solo e sua localização. Entretanto, existem fatores de ordem não-natural (ligados aos tipos de usos da superfície - compactação, impermeabilização, supressão da vegetação, etc) que podem afetar negativamente os processos de infiltração da água nos solos.

Os solos da região do oeste do estado da Bahia são em geral homogêneos, tendo como material de origem as rochas arenosas do Grupo Urucuia, que compõem um sistema aquífero do tipo intergranular. São solos, na maioria, desenvolvidos numa área de relevo plano, com inclinação para leste inferior a 5%, no extenso chapadão do oeste baiano, principal área de recarga do Sistema Aquífero Urucuia. Nessa região é intensa a atividade agrícola com o cultivo de soja, algodão, milho, bem como a pecuária e reflorestamentos de pinheiros e eucaliptos.

Esses solos são constantemente submetidos ao preparo com uso de máquinas que compreende uma série de práticas de aração e gradagem pesada. Segundo EMBRAPA (2003), essas práticas ocasionam a compactação do solo, e são predominantes em comparação à prática de plantio direto na região. As consequências físicas resultantes são principalmente a baixa infiltração de água, ocorrência de enxurrada, resistência à penetração dos implementos de preparo, exigindo cada vez maior potência das máquinas no preparo do solo.

A compactação acarreta, sobretudo, modificações nas condições de infiltração da água nos solos, as quais são primordiais para a garantia de recarga dos aquíferos.

Nessa região a agricultura de sequeiro é uma prática dominante, entretanto, é crescente o número de projetos de irrigação com uso de águas superficiais e subterrâneas.

A utilização dos recursos hídricos nessa região foi inicialmente direcionada à exploração de água dos afluentes da margem esquerda do rio São Francisco. Esses rios são alimentados no período de estiagem pelo próprio fluxo de base do Sistema Aquífero Urucuia e por isso sua maior importância está vinculada ao fato de contribuírem com cerca de 37,5% (Ramos & Silva 2002) de vazões mínimas para o rio São Francisco. Atualmente o manancial superficial encontra-se sobre pressão, de forma que a demanda crescente de água para irrigação busca o manancial subterrâneo como alternativa de suprir as dificuldades de concessão de outorga de uso de água superficial, emitidas pela SRH-BA (Superintendência de Recursos Hídricos do estado da Bahia).

O número crescente de concessão de outorgas de direitos de uso da água subterrânea, segundo Silva *et al.* (2005), ocorre pelo fato de que alguns rios da região já atingiram o limite legal máximo outorgável, não ha-

vendo, portanto, disponibilidade para novas emissões de outorgas de águas superficiais, o que ocasiona uma maior procura pela água subterrânea.

O aquífero mostra-se bastante promissor, uma vez que existem poços tubulares profundos operando, em áreas irrigadas da região com vazões superiores a 400 m³/h (Schuster *et al.* 2003).

A manutenção de áreas com cobertura vegetal natural é importante para a recarga do Sistema Aquífero Urucuia, de forma que se mantenham condições favoráveis de infiltração. Entretanto, não se observa tal preocupação, uma vez que as áreas de cerrado preservado são escassas. A diversidade de culturas e de usos daqueles solos, juntamente com o intenso desmatamento do cerrado já preocupa quanto à possível depreciação das condições de recarga natural.

Pimentel *et al.* (2000) avaliou a recarga média do Sistema Aquífero Urucuia, na bacia do rio das Fêmeas, afluente do rio Grande, no período de 1984 a 1995. Utilizou a separação de hidrogramas do rio e pelo cálculo do volume de fluxo de base, no período, chegou a um valor de 20% da precipitação média para a recarga. Essa bacia avaliada apresentava cerca de 30% de ocupação do solo, em grande parte por atividades agrícolas. Segundo verificação do autor existia um desmatamento acentuado na cabeceira da sub-bacia, área principal de recarga do aquífero, que pode estar influenciando na quantidade de água que infiltra, pois a ausência de vegetação favorece o escoamento superficial, reduz a infiltração e provoca erosão, o que poderia comprometer significativamente a recarga do aquífero, alterando o sistema rio-aquífero.

Diante do exposto, o trabalho tem como objetivo apresentar os resultados das variações da condutividade hidráulica vertical, relacionadas aos tipos de usos a que esses solos são submetidos. A condutividade hidráulica vertical é considerada um dos parâmetros controladores da infiltração da água nos solos e esta da recarga dos aquíferos.

A área em estudo localiza-se no extremo oeste do estado da Bahia (Fig. 1), inserida na unidade geomorfológica do Chapadão Central, no médio São Francisco. A região possui relevo suave ondulado, com altitudes entre 520 e 920 metros, na forma de um extenso plano norte-sul com inclinação inferior a 5% no sentido oeste-leste e desníveis associados às bordas assimétricas dos rios (Brasil 1982).

A cobertura vegetal natural, nas áreas preservadas, é representada por cerrado nas chapadas e veredas ao longo dos cursos d'água. Entretanto, na sua maior parte, a área é dominada pela cultura de soja, milho, algodão, café e frutas, em substituição ao cerrado natural.

O volume de precipitação média anual aumenta de leste para oeste nessa região, com médias anuais entre 1.200 mm, no extremo leste, e 1.600 mm, na parte ocidental. A evapotranspiração potencial é em média 120 mm mensais, segundo dados das estações do INMET para a região.

O contexto geológico do Chapadão Central

Figura 1 - Mapa de localização do Sistema Aquífero Urucuia, e localização dos ensaios de infiltração *in situ*.

consiste de arenitos flúvio-eólicos do Grupo Urucuia, com a presença de níveis silicificados e em menor proporção níveis conglomeráticos, pertencente à Bacia Sanfranciscana que representa a cobertura fanerozoica do Cráton do São Francisco. Essa unidade funciona, na região, como um aquífero intergranular com condições favoráveis para a circulação e grandes vazões médias em poços de alta capacidade específica.

Os solos predominantes nessa área são Latossolos, seguidos por Neossolos Quartzarênicos, os quais representam as unidades de maior expressão geográfica na área do Chapadão Central. Gleissolo, Argissolo, Neossolo Litólico e Cambissolo ocorrem em menores proporções (Brasil 1982, IBGE & Embrapa 2003).

As unidades avaliadas neste estudo foram o Latossolo e o Neossolo Quartzarênico, desde a região do vale do rio Arrojado, na parte sul da área; ao longo das adjacências da BR-020 entre Posse (GO) e Luís Eduardo Magalhães (BA); em pontos próximos à BR-242 entre Luís Eduardo e Barreiras (BA) e entre Luís Eduardo Magalhães e Taguatinga (TO), na porção norte da área; e na região da rodovia denominada “Anel da Soja” BA-

460 (Fig. 1 e Tab. 1).

O SISTEMA AQUÍFERO URUCUIA O Sistema Aquífero Urucuia (SAU) representa um manancial subterrâneo de extensão regional, composto por subtipos de aquíferos inter-relacionados. Ocorre em quartzo arenitos e arenitos feldspáticos eólicos, bem selecionados, com presença de níveis silicificados, e em menor proporção níveis conglomeráticos, relacionados ao Grupo Urucuia, Neocretáceo da Bacia Sanfranciscana, cobertura fanerozoica do Cráton São Francisco.

A área efetiva do SAU estende-se por 76.000 km² desde o sul do Piauí até o noroeste de Minas Gerais, tendo sua maior expressão em área relacionada ao oeste do Estado da Bahia. Apresenta um eixo divisor longitudinal que separa o fluxo subterrâneo para o sentido oeste (bacia hidrográfica do Tocantins) e o sentido leste (bacia hidrográfica do São Francisco) (Fig. 2). À oeste do divisor há um aumento progressivo da profundidade da superfície potenciométrica, caracterizada pela presença de níveis estáticos profundos.

Os dados disponíveis admitem a proposição de

Tabela 1 - Valores de condutividade hidráulica vertical (K_v , em m/s) em superfície (duplo anel), e em profundidade (open-end hole) e principais características dos usos e solos nos pontos estudados. (LVA - Latossolo Vermelho-Amarelo; RQ - Neossolo Quartzarênico).

Inf	Classe	Característica do local	K_v (m/s)				
			0m	0,5m	1m	1,5m	2,0m
1	LVA	Cerrado modificado (Vila Rosário)	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$3,9 \cdot 10^{-6}$	$3,3 \cdot 10^{-6}$	$1,9 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$
2	LVA	Cerrado modificado (Vila Rosário)	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$
3	LVA	Cerrado modificado, adjac. BR-020	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$7,2 \cdot 10^{-7}$	$9,1 \cdot 10^{-7}$
4	LVA	Cerrado modificado, próx. estrada	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-6}$	$2,8 \cdot 10^{-6}$	$2,9 \cdot 10^{-6}$	$2,0 \cdot 10^{-6}$
5	LVA	Cerrado ralo. Cabeceira do rio Arrojado	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$4,7 \cdot 10^{-6}$	$3,4 \cdot 10^{-6}$	$3,8 \cdot 10^{-6}$	$2,8 \cdot 10^{-6}$
6	RQ	Vereda na bacia do rio Arrojado	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$7,3 \cdot 10^{-6}$	$5,9 \cdot 10^{-6}$	$4,2 \cdot 10^{-6}$
7	RQ	Cerrado	$7,1 \cdot 10^{-4}$	$6,3 \cdot 10^{-6}$	$2,8 \cdot 10^{-6}$	$2,4 \cdot 10^{-6}$	$3,5 \cdot 10^{-6}$
8	LVA	Pasto	$5,3 \cdot 10^{-5}$	$3,4 \cdot 10^{-6}$	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$2,4 \cdot 10^{-6}$
9	LVA	Cerrado ralo (próx. lavoura soja)	$2,9 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$
10	LVA	Cerrado <i>sensu strictu</i>	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$4,9 \cdot 10^{-6}$	$2,8 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$6,8 \cdot 10^{-7}$
11	LVA	Cerrado	$7,2 \cdot 10^{-5}$	$1,9 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$
12	LVA argiloso	Cultura de pinheiro (Faz. Floryl)	$4,3 \cdot 10^{-4}$	$2,9 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$	$3,4 \cdot 10^{-7}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$
13	LVA	Cerrado	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$3,1 \cdot 10^{-6}$	$2,3 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$
14	LVA	Estrada não-pavimentada (Floryl)	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$8,9 \cdot 10^{-7}$	$9,1 \cdot 10^{-7}$
15	LVA	Lavoura de soja	$2,7 \cdot 10^{-5}$	-	-	-	-
16	LVA	Campo limpo	$4,1 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$	$4,3 \cdot 10^{-6}$	$3,6 \cdot 10^{-6}$	$4,8 \cdot 10^{-6}$
17	LVA	Cerrado ralo	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$6,1 \cdot 10^{-6}$
18	LVA	Cerrado	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$2,6 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$9,3 \cdot 10^{-7}$
19	LVA	Cerrado modificado	$7,2 \cdot 10^{-5}$	$2,1 \cdot 10^{-6}$	$2,0 \cdot 10^{-6}$	$2,0 \cdot 10^{-6}$	$2,6 \cdot 10^{-6}$
20	LVA	Cerrado modificado (Arrojoelândia)	$9,6 \cdot 10^{-5}$	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$2,0 \cdot 10^{-6}$	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$
21	LVA	Cerrado ralo (atividade biológica)	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$3,3 \cdot 10^{-6}$	$2,0 \cdot 10^{-6}$	$8,0 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$
22	LVA	Cultura de eucalipto (BR-020)	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$2,0 \cdot 10^{-6}$	$8,0 \cdot 10^{-7}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$
23	LVA argiloso	Adjacente a uma lavoura de soja	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$4,8 \cdot 10^{-7}$	$4,0 \cdot 10^{-7}$	$3,6 \cdot 10^{-7}$
24	LVA	Pasto (compactação superficial)	$5,6 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$	$9,7 \cdot 10^{-7}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$5,2 \cdot 10^{-7}$
25	LVA	Cerrado modificado (solo arenoso)	$5,3 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$
26	RQ	Cerrado modificado (rio de Ondas)	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$2,0 \cdot 10^{-6}$
27	LVA arenoso	Loteamento residencial (compacto)	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$2,8 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$
28	LVA	Cerrado “anel da soja” (BA-460)	$3,1 \cdot 10^{-4}$	$9,6 \cdot 10^{-6}$	$8,0 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$
29	LVA arenoso	Cerrado, próximo à BR-242	$4,5 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$9,9 \cdot 10^{-7}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$
30	LVA	Cerrado, próximo à BR-242	$6,4 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$1,9 \cdot 10^{-6}$
Valor médio (m/s)			$2,0 \cdot 10^{-4}$	$4,8 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$	$1,9 \cdot 10^{-6}$

quatro subtipos de aquíferos no SAU: aquífero livre regional; aquífero suspenso local; aquífero confinado ou

semiconfinado e aquífero livre profundo. A existência de níveis silicificados, variações granulométricas nos

Figura 2 - Eixo divisor de fluxo subterrâneo no Sistema Aquífero Urucuia.

arenitos e a posição geográfica e espacial são os principais parâmetros controladores da presença e/ou predominância desses subtipos de aquífero dentro do sistema (Fig. 3).

Os parâmetros hidrodinâmicos são os seguintes: condutividade hidráulica (K) de 10^{-6} a 10^{-7} m/s e transmissividade (T) de 10^{-4} a 10^{-5} m/s para o aquífero livre regional; $K=10^{-6}$ m/s e $T=10^{-3}$ m/s para o aquífero livre profundo; $K=10^{-5}$ m/s, $T=10^{-3}$ a 10^{-2} m/s e coeficiente de armazenamento (S) de 10^{-4} para o aquífero confinado ou semiconfinado.

As reservas de água permanentes estimadas são de $3,77 \cdot 10^{12}$ m³, enquanto que as reservas reguladoras são de aproximadamente $30,78 \cdot 10^9$ m³/ano (Gaspar 2006).

MÉTODOS Em cada ponto foram realizados ensaios de infiltração para a estimativa dos valores da condutividade hidráulica vertical (K_v) dos solos, sendo cada ponto testado em superfície, com aplicação do método do infiltrômetro de duplo anel e, em profundidade, com aplicação de testes tipo *open end hole*. Conforme ABGE (1996) esses ensaios são classificados como ensaios de rebaixamento, realizados com carga variável (flutuação do nível d'água) e com injeção de água, na zona não saturada do aquífero. Esses métodos têm como principal

característica avaliar a infiltração da água verticalmente, possibilitando a avaliação do potencial superficial dos solos à recarga nos períodos de excedente hídrico.

Os ensaios com infiltrômetro de duplo anel foram realizados com um cilindro duplo, concêntrico, de aço, de 25 cm de altura, com diâmetro de 35 cm do anel interno e de 45 cm do externo, cravados entre 5 e 10 cm nos solos, para testes superficiais. Nesse tipo de infiltrômetro a água é adicionada nos dois compartimentos do anel, sendo que a função do anel externo é evitar a dispersão da água a partir do anel interno e garantir a verticalidade do movimento da água no solo. Para tanto, o anel externo deve ter o nível d'água sempre acima do nível no anel interno e ter sido enchido antes de se adicionar água no cilindro interno (Bernardo 1986).

O cálculo dos valores da condutividade hidráulica vertical (K_v) com esse método, considerando a carga variável, foi determinado pela seguinte equação 1:

$$K_v = U \cdot \frac{I}{\Delta t} \cdot \ln \frac{h_0}{h_t} \quad (1)$$

onde:

K_v = condutividade hidráulica vertical (m/s);

U = fator de conversão de mm/min para m/s = 1/60000;

Figura 3 - Mapa da distribuição espacial preliminar dos subtipos de aquíferos dentro da área efetiva do Sistema Aquífero Urucuia.

I = profundidade de penetração do anel no solo (mm);

Δt = o intervalo de tempo do ensaio (s);

h_0/h_i = razão entre os níveis d'água inicial e final lidos no anel interno.

Os ensaios do tipo *open end hole*, utilizados para a avaliação de K_v nas profundidades de 50, 100, 150 e 200 cm, por meio da utilização de poços de observação feitos com trado manual e revestidos por tubos de PVC liso, cravados no fundo para evitar a perda de água entre o tubo e a parede do solo. Dessa forma garante-se que a área de infiltração seja restrita ao fundo do poço. Para a determinação da K_v utilizou-se a equação 2 (adaptada de USDIBR 1998):

$$K_v = \frac{r_1}{4 \cdot \Delta t} \cdot 2,303 \log \frac{h_0}{h_t} \quad (2)$$

onde:

K_v = condutividade hidráulica vertical (m/s);

r_1 = raio interior do tubo de PVC (m);

Δt = o intervalo de tempo do ensaio (s);

h_0/h_i = razão entre os níveis d'água inicial e final lidos no anel interno.

Os solos avaliados são Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), com textura média e argilosa, que ocorrem nas áreas de chapada plana e Neossolo Quartzarênico (RQ), que estão próximo às drenagens, tendo sido observados no vale dos rios Arrojado e de Ondas. As amostragens para ensaios granulométricos foram feitas em 6 pontos em diferentes profundidades: Inf 03 (100, 150 e 200 cm), Inf 04 (50 e 100 cm), Inf 06 (150 cm), Inf 08 (amostra composta), Inf 12 (100, 150 e 200 cm) e Inf 23 (50, 100 e 150 cm).

No geral os ensaios tiveram duração máxima de 40 minutos. Nos casos onde os valores são muito elevados (ordem de 10^{-4} m/s), notadamente em ensaios superficiais, a duração foi a máxima possível, de cerca de 1 hora, antes da infiltração total do compartimento interno. Em alguns casos os ensaios foram repetidos sob diferentes condições de umidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO Os valores de condutividade hidráulica vertical (K_v) obtidos em ambos os ensaios (em superfície e em profundidade) variam da ordem de grandeza de 10^{-4} a 10^{-7} m/s (Tab. 1). Para Fiori & Carmignani (2001), são valores típicos de condutividades hidráulicas de depósitos inconsolidados do tipo areia limpa a areia siltosa, onde os fluxos esperados são de alta descarga a fluxos de baixa descarga (drenagem

deficiente).

Dentre os ensaios realizados em superfície, com duplo anel, os valores médios de Kv situaram-se próximos 10^{-4} m/s, ou seja, valores equivalentes a fluxos de drenagem livre, com variações em alguns ensaios para fluxos de drenagem deficiente, cujos valores são da ordem de 10^{-5} e 10^{-6} m/s. Essas variações são atribuídas aos solos que sofreram alguma forma de modificação, devido aos usos a que são submetidos.

Os menores valores de Kv em superfície foram obtidos nos ensaios 8, 11, 14, 15, 19, 20, 24, 25 e 27, que apresentam usos em superfície que ocasionaram a diminuição de seus valores em relação ao estado natural, como pastos, estrada e loteamento residencial, por exemplo, (Tab. 2). O ensaio de número 23 apresentou um valor de Kv baixo ($1,5 \times 10^{-6}$ m/s), que pode ter sua origem ligada tanto ao local do ensaio, mas sobretudo à sua textura argilosa e ausência de estruturação no horizonte superficial. Este ensaio foi realizado adjacente a uma plantação de soja, por onde circulam tratores e veículos pesados, o que resulta em grande compactação superficial.

Para os ensaios realizados em profundidade, do tipo *open end hole* os valores de Kv obtidos foram da ordem de 10^{-6} m/s, evidenciando uma grande homogeneidade dos solos. De forma geral, observou-se uma diminuição progressiva da condutividade hidráulica com a profundidade de teste.

Os ensaios 6 (Neossolo Quartzarênico) e 16 (cerrado campo limpo - Latossolo Vermelho-Amarelo Arenoso) são os que representam as melhores condições de infiltração ao longo do perfil, com valores de Kv igual a 10^{-4} m/s na superfície (< 50cm), 10^{-5} m/s de 50 a 100cm de profundidade e mantendo-se constante em 10^{-6} m/s de 100 a 200cm de profundidade. Em dez, dos trinta ensaios realizados (33,3% dos casos), observou-se uma redução nos valores de Kv, de 10^{-6} m/s para

10^{-7} m/s, a partir de profundidades maiores que um metro (Tab. 2).

A homogeneidade dos valores de Kv em torno de 10^{-6} m/s com pequenas variações é comum em Latossolo de áreas de chapada, independente do seu material de origem. Esse fato é decorrente da estruturação granular e grumosa comumente observada nesses solos, além de sua ocorrência em terrenos planos a pouco ondulados e sua espessura sempre superior a 200 cm. Valores da mesma ordem de grandeza de Kv foram obtidos por Cadamuro *et al.* (2000), na região de Caldas Novas, por Souza & Campos (2001) e Cadamuro (2002), no Distrito Federal e por Almeida (2003), na região sudoeste de Goiás. Nessas localidades os materiais parentais dos latossolos são respectivamente, quartzitos, metasedimentos argilosos/arenosos e arenitos/basaltos.

Dos valores mais baixos (ordem de grandeza de 10^{-7} m/s) obtidos nos ensaios do tipo *open end hole*, alguns incluem ensaios em áreas de usos degradantes e/ou diversos: estrada (Inf 14), pasto (Inf 24), reflorestamento de pinheiro (Inf 12). Nos demais, os menores valores de Kv podem ser justificados pelo seu caráter mais argiloso (Inf 3 e 23 – Fig. 2) e pela eliminação progressiva da estruturação desses solos observada em profundidade.

Observou-se uma correlação entre o aumento do conteúdo de argila (em profundidade) e a diminuição do valor de Kv. Essa correlação é clara nos ensaios 3, 12 e 23, que apresentaram um aumento de até 10% do conteúdo de argila, a partir da superfície até 200 cm de profundidade, e uma progressiva diminuição dos valores de Kv (Fig. 4). Essa relação também foi observada por Almeida (2003), onde os valores de condutividade hidráulica variam de 10^{-5} m/s, em superfície, até 10^{-7} m/s, a 200 cm de profundidade, em Latossolo da bacia do alto rio Claro, no sudoeste do estado de Goiás.

O estudo sistemático das condutividades hi-

Figura 4 - Relação entre condutividade hidráulica (Kv) e conteúdo de argila (%), em profundidade.

drálicas verticais em Latossolo de regiões genericamente denominadas de chapadas demonstra que, quando em condições naturais (sem uso intensivo), esse tipo de solo imprime importante controle nas condições de infiltração, independentemente do tipo de substrato presente e da textura desses solos. Esse fator é explicado pela elevada homogeneidade do perfil pedológico e pela estruturação granular pequena a média ou grumosa comumente presente nesses solos. As áreas de chapadas apresentam funcionamento hídrico que resulta em condições eficientes à infiltração da água das chuvas nos solos. Do ponto de vista dos recursos hídricos subterrâneos, os solos desempenham as funções filtro e reguladora dos aquíferos (respectivamente definidas pelo papel de depuração natural das águas de percolação vertical e pela regularização das vazões/perenidade dos cursos d'água superficiais nos períodos de recessão das chuvas). Essas funções são desempenhadas com grande eficiência em latossolos, mesmo quando situados sobre aquíferos fraturados desenvolvidos em rochas cristalinas e argilosas.

O fato de esses solos apresentarem diminuição da estruturação em profundidade, onde a estrutura granular passa a grumosa, e a estrutura grumosa tende a se tornar pouco freqüente pode também explicar a sensível diminuição da condutividade hidráulica vertical com o aumento progressivo da profundidade.

Esse comportamento diferenciado em profundidade pode desviar o fluxo vertical da água durante a recarga, induzindo uma taxa variável de interfluxo, dependendo do padrão geomorfológico local. No caso das amplas áreas de chapadas esse comportamento é insignificante uma vez que, mesmo que haja uma interrupção do sentido vertical da infiltração as perdas pelo fluxo interno são restritas. Contudo, em se tratando das bordas de chapadas e proximidades das calhas dos rios, esse desvio provocaria uma perda significativa, por interfluxo, e diminuição da recarga efetiva do aquífero.

Os valores de Kv são bastante discutidos na literatura sob o ponto de vista hidrogeológico, principalmente no que concerne à sua relação entre o estado de saturação e textura / estrutura dos solos. Segundo Fetter (1994) e Tucci (2000) a condutividade hidráulica de um solo argiloso pode ser maior que a de um solo arenoso, quando ambos estão em um estado não saturado. Pelos resultados obtidos verifica-se que nos solos mais arenosos a condutividade hidráulica é sensivelmente superior a dos latossolos argilosos. Apesar das diferenças essa variável apresenta destacada importância para garantia do processo de recarga do Sistema Aquífero Urucuia.

A condutividade hidráulica desses solos pode até ser um atributo que deve ser monitorada sistematicamente nos solos com uso continuado e solos sob condições naturais, diante dos inúmeros fatores que resultam na fragilidade ambiental desses solos. Aponta-se como sugestão o monitoramento da condutividade hidráulica vertical, por exemplo, em solos que usam o sistema de plantio direto e naqueles onde se usa intensivamente

te o preparo com máquinas pesadas que ocasionam a compactação e formação de blocos rígidos. Martins *et al.* (1993) apontam uma fragilidade de caráter físico, atribuída a forte predominância da fração areia, baixa capacidade de retenção de água e pela permeabilidade elevada.

CONCLUSÕES Os valores de Kv dos solos analisados variam da ordem de 10^{-4} e 10^{-7} m/s, sendo os maiores valores observados em Neossolo Quartzarênico, observado nos vales do rio Arrojado (parte sul da área) e do rio de Ondas (parte norte da área), e um valor médio de 10^{-6} m/s em Latossolo das amplas áreas de chapada.

Os resultados obtidos apontaram para uma grande homogeneidade dos valores de condutividade hidráulica da região oeste da Bahia, em comparação com resultados obtidos em Latossolo de áreas de chapada nas regiões do Distrito Federal, Caldas Novas (GO) e no sudoeste do estado de Goiás (bacia do alto rio Claro).

No Distrito Federal Souza & Campos (2001) obtiveram valores da ordem de 10^{-4} a 10^{-5} m/s nos testes superficiais em Latossolos de áreas de chapada. Em Caldas Novas (GO) Cadamuro *et al.* (2000) obtiveram valores da ordem de 10^{-4} m/s nos testes superficiais em Latossolos com método dos anéis concêntricos e da ordem de 10^{-6} a 10^{-7} m/s nos testes do tipo *open end hole* também em latossolos de áreas de chapada.

Os valores de Kv na camada superficial, obtidos com anéis concêntricos apontaram valores mais baixos para os solos analisados em áreas de pastagem, loteamento residencial, estrada, áreas de reflorestamento e adjacentes às plantações de soja. Nas áreas de pasto e estrada não-pavimentada observou-se durante a execução do ensaio uma compactação dos primeiros centímetros dos perfis. A compactação das estradas não-pavimentadas pode também ser qualitativamente caracterizada pelo aumento do volume de água escoada na superfície do terreno durante o período chuvoso. A observação do escoamento superficial durante eventos de pico de precipitação mostra que as vias entre as parcelas de lavouras e as de acesso às sedes das fazendas se transformam em pequenos rios, que conduzem um grande volume de água superficial após esses eventos de precipitação extremos.

Observou-se uma diminuição do valor de Kv com o aumento da profundidade nos testes tipo *open end hole*. Essa diminuição está relacionada ao aumento do conteúdo de argila ao longo do perfil testado e também pode estar associada a eliminação progressiva da estruturação dos solos observada com o aumento da profundidade.

As áreas de chapadas regionais recobertas por latossolos são muito importantes para as condições de sustentabilidade dos aquíferos, uma vez que essas áreas contribuem para as funções de recarga e regularização, sendo relevantes tanto para a manutenção das vazões de drenagens superficiais, quanto para controlar as reservas explotáveis dos aquíferos profundos.

Referências

- ABGE Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental. 1996. *Ensaio de permeabilidade em solos - orientações para sua execução no campo*. 3ª ed, São Paulo, Boletim 4, 35p.
- Almeida L. 2003. *Caracterização Hidrogeológica da Bacia do Alto rio Claro no estado de Goiás: Subsídios para o Gerenciamento dos Recursos Hídricos*. Brasília, Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 101p.
- Bernardo S. 1986. *Manual de irrigação*. Viçosa, UFV, 596p.
- Brasil. 1982. Ministério de Minas e Energia. Secretaria-Geral. Projeto RADAMBRASIL. Folha SD-23 Brasília; geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra, vol. 29, 660p. Rio de Janeiro.
- Cadamuro A.L.M. 2002. *Proposta, avaliação e aplicabilidade de técnicas de recarga artificial em aquíferos fraturados para condomínios residenciais do Distrito Federal*. Brasília, Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. 130p.
- Cadamuro A.L.M., Rego A.P.M., Joko C.T., Giustina C.C.D., Pontes C.H.C., D'Angiolella G., Oliveira L.A., Lima M.C. 2000. *Hidrogeologia Aplicada na região de Caldas Novas, Goiás: caracterização dos aquíferos e balanço hídrico preliminar*. Universidade de Brasília, Brasília-DF, 93p.
- USDIBR United States Department of the Interior, Bureau of Reclamation. 1998. *Earth Manual: A Water Resources Technical Publication - A guide to the use of soils as foundations and as construction materials for hydraulic structures. Part I*. Third Edition, United States Government Printing Office. Denver, Colorado, 810 p.
- EMBRAPA 2003. Tecnologias de Produção de Soja Região Central do Brasil 2003. Sistema de Produção, 1. Versão Eletrônica Jan 2003, EMBRAPA SOJA. Disponível em: <http://www.cnpso.embrapa.br/producao soja/manejo.htm>. Acesso em: 23/03/2006.
- Fetter C.W. 1994. *Applied Hydrogeology*. Third Edition. New York, MacMillan College Publ. Co., 619 p.
- Fiori A.P. & Carmignani L. 2001. Percolação de água em maciços rochosos. In: A.P. Fiori & L. Carmignani (eds.) *Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas; aplicação na estabilidade de taludes*. Curitiba, Editora da UFPR, p.369-394.
- Funatura. 1991. *Caracterização dos solos da área de chapada da fazenda Jatobá, no município de Correntina (BA)*. Brasília, Fundação Pró-Natureza para a Floryl.
- Gaspar M.T.P. 2006. *Sistema Aquífero Urucuia: Caracterização Regional e Propostas de Gestão*. Brasília, Tese de Doutorado n° 76, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 158p e anexos.
- IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística & EMBRAPA Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2003. Mapa de Solos do Brasil. Rio de Janeiro, escala: 5.000.000.
- Martins E.S., Lopes Assad M.L.R.C, Campos J.E.G. 1993. Comportamento de solos desenvolvidos de arenito Urucuia. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 24, Goiânia, *Anais*, vol.1, p. 171-172.
- Pimentel A.L., Aquino R.F., Silva R.C.A., Vieira C.M.B. 2000. Estimativa da recarga do aquífero Urucuia na sub-bacia do rio das Fêmeas – Oeste da Bahia, utilizando separação de hidrogramas. In: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, Congresso sobre Aproveitamentos e Gestão de Recursos Hídricos em países de Idioma Português, 1, *Atas*, CD-rom.
- Ramos A.M. & Silva F.F. da. 2002. Contribuição dos Mananciais Superficiais do Estado da Bahia para o Rio São Francisco. In: ABRH, Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 6, Maceió, CD-Rom.
- Silva F.F, Neto A.V.L, Cardoso E.R., Schuster H.D.M. 2005. Aplicação da modelagem matemática no uso conjunto água superficial e subterrânea para a gestão de recursos hídricos no oeste do Estado da Bahia. In: ABRH, Simpósio de Recursos Hídricos da Amazônia, 2, Palmas (TO), *Atas*, CD-Rom.
- Souza M.T. & Campos J.E.G. 2001. O papel dos regolitos nos processos de recarga de aquíferos do Distrito Federal. *Revista Escola de Minas*, 54(3):191-198.
- Schuster H.D. 2003. *Modelagem de Fluxo Subterrâneo com vistas à definição de parâmetros para outorgas de mananciais subterrâneos na bacia hidrográfica do rio dos Cachorros – Oeste do estado da Bahia*. Projeto Rio dos Cachorros, OMM-SRH/BA. 113p e anexos.
- Tucci C.E.M. (Org.) 2000. *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. Porto Alegre, Editora Universidade/UFRGS, ABRH, p. 943.

Manuscrito AE-013/2006

Submetido em 26 de março de 2006

Aceito em 15 de setembro de 2007