

LEVANTAMENTO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA NA CIDADE DE ARAGUARI, MG, COM VISTAS AO ESTUDO DA VULNERABILIDADE À POLUIÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.

Nathália Assunção de Souza¹ & José Eduardo Alamy Filho²

RESUMO - O parâmetro condutividade hidráulica superficial tem sido empregado como um dos critérios para a avaliação da vulnerabilidade à poluição de aquíferos. Para obtenção desse parâmetro, utilizaram-se os ensaios de infiltração, os quais mostraram-se extremamente práticos para a determinação em campo da condutividade hidráulica. Nesse ensaio, também denominado de “infiltração a nível constante”, utiliza-se uma carga hidráulica constante, medindo a vazão necessária para mantê-la. Neste trabalho, foram realizados testes em dezenove pontos na zona urbana da cidade de Araguari, MG. Descrições do aparelho utilizado, dos procedimentos de ensaio, além do tratamento dos dados, são apresentadas no presente trabalho. Em uma segunda etapa, fez-se a comparação do uso e ocupação do solo com a condutividade hidráulica superficial, como forma de identificar regiões com maior ou menor potencial poluidor das águas subterrâneas. Os resultados revelam que há setores da cidade com valores mais elevados de condutividade hidráulica, os quais situam-se em locais sem conexão do esgoto doméstico às redes coletoras. Isto indica que essas regiões apresentam um risco potencial de poluição do solo e, conseqüentemente, do lençol freático. Apesar disso, as maiores concentrações de indústrias situam-se em locais de condutividade hidráulica superficial relativamente baixa.

ABSTRACT – The hydraulic conductivity of surface layers has been used as a parameter for evaluate the aquifer vulnerability to pollution. Infiltration tests, performed *in situ*, were used, which consists of practical procedures to obtain this parameter. In these tests, also called “constant level infiltration”, the water discharge, sufficient to keep the hydraulic head constant, is measured. In this paper, nineteen tests were performed in the urban area of Araguari, at Minas Gerais state. This paper also presents the description of equipments, the field tests procedures, beyond the data treatment. The soil use and occupation was compared with the surface hydraulic conductivity values, providing the identification of areas with potential risks of groundwater pollution. According to the results, there are sectors with high hydraulic conductivity, placed in zones without sanitary sewer. This stands out the pollution susceptibility risks of soil and, therefore, of water table in these regions. The region of denser industrial activities, however, is placed over low hydraulic conductivity soils.

Palavras-chave: águas subterrâneas, condutividade hidráulica, uso e ocupação do solo.

¹ Mestranda em Engenharia Urbana pela Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia (FECIV/UFU), Av. João Naves de Ávila, 2121, Campus Santa Mônica, Bloco 1Y, Uberlândia, MG- Brasil. Telefone: (34)3239-4170. E-mail: nathalia_ass@yahoo.com.br.

² Professor adjunto da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia (FECIV/UFU), Av. João Naves de Ávila, 2121, Campus Santa Mônica, Bloco 1Y, Uberlândia, MG- Brasil. Telefone: (34)3239-4170. E-mail: zeedu@feciv.ufu.br.

1 - INTRODUÇÃO

Segundo Auge (2004) existem dois sentidos distintos de se considerar a vulnerabilidade natural à poluição da água subterrânea. O primeiro é defendido por investigadores que consideram a vulnerabilidade como uma propriedade referida exclusivamente ao meio (tipo de aquífero e cobertura, condutividade hidráulica, profundidade e recarga), sem levar em consideração a incidência das substâncias poluentes (vulnerabilidade intrínseca). O segundo agrupa os investigadores que extrapolam este conceito da exclusividade do meio, transcendendo ao tipo de carga contaminante (vulnerabilidade específica).

Segundo Foster e Hirata (1988), a caracterização da vulnerabilidade do aquífero pode ser definida por meio dos seguintes fatores:

- capacidade de atenuação, resultante de retenção físico-química ou de reações com os poluentes;
- acessibilidade de poluentes à zona saturada.

Assim, uma diminuta vulnerabilidade intrínseca de um aquífero é função da inacessibilidade hidráulica à penetração de poluentes e da capacidade de atenuação, como resultado da retenção física e das reações químicas com os agentes poluidores. Nesse contexto, a facilidade da penetração de poluentes, a partir da superfície, ou a partir da camada superficial de solo, pode ser avaliada em função da condutividade hidráulica superficial. A condutividade hidráulica, em linhas gerais, é o índice que representa a facilidade da água escoar entre um ponto e outro do meio poroso. Dessa forma, o conhecimento da condutividade hidráulica da formação superficial é de grande importância para o estudo da vulnerabilidade à poluição, haja vista que este parâmetro indica a maior ou menor facilidade de percolação do poluente. Tomando por base a penetração superficial de poluentes, o estudo do uso e ocupação do solo, além da determinação em campo das condutividades hidráulicas, também constitui outra abordagem importante na avaliação da vulnerabilidade de aquíferos.

O objetivo geral deste trabalho consiste na comparação do uso e ocupação do solo com a condutividade hidráulica superficial, de forma a identificar regiões com maior ou menor potencial poluidor. Para isso, fez-se o levantamento do parâmetro condutividade hidráulica superficial, na zona urbana da cidade Araguari, estado de Minas Gerais, mediante ensaio de infiltração *in situ*. Como a referida cidade é totalmente abastecida por água subterrânea, proveniente do aquífero livre Bauru, e a captação ocorre por meio de poços tubulares distribuídos na zona urbana, a determinação da

condutividade hidráulica da formação superficial é justificada, tendo em vista avaliações futuras da vulnerabilidade intrínseca do aquífero.

2 - METODOLOGIA

2.1 - Condutividade Hidráulica

A condutividade hidráulica (K), aqui pesquisada, relaciona-se com o manto superficial, medida a aproximadamente 0,6 m abaixo da superfície do terreno. Nesse aspecto, ela atua como um indicador da facilidade de um poluente, lançado superficialmente (vazamentos em redes de esgoto, infiltração em sumidouros, fertilizantes, entre outros), percolar para regiões mais profundas.

Os ensaios de infiltração em furos de sondagens consistem na medida da vazão absorvida em função da aplicação de uma carga hidráulica. As cargas são diferenciais de pressão, induzidas por colunas de água, resultantes de injeção de água no furo. Nos ensaios, descritos neste trabalho, utilizou-se carga hidráulica constante, medindo a vazão necessária para mantê-la.

2.1.1 - Seleção dos pontos a serem ensaiados

A definição dos pontos a serem ensaiados neste trabalho levou em consideração os seguintes critérios:

- Distribuição espacial, selecionando pontos bem distribuídos na área urbana, fato que contribui para uma melhor interpolação dos resultados no espaço;
- Pontos próximos a poços operantes, de forma a facilitar o suprimento de água durante a realização do ensaio;
- Proximidade de regiões potenciais de poluição, para que pudesse ser feito a comparação de dados de condutividade hidráulica com o uso e ocupação do solo nessas áreas.

Dessa forma, definiram-se dezenove pontos, bem distribuídos na área analisada, com o objetivo de levantar os valores da condutividade hidráulica. A Figura 1 ilustra a distribuição espacial dos pontos utilizados no levantamento da condutividade hidráulica em campo.

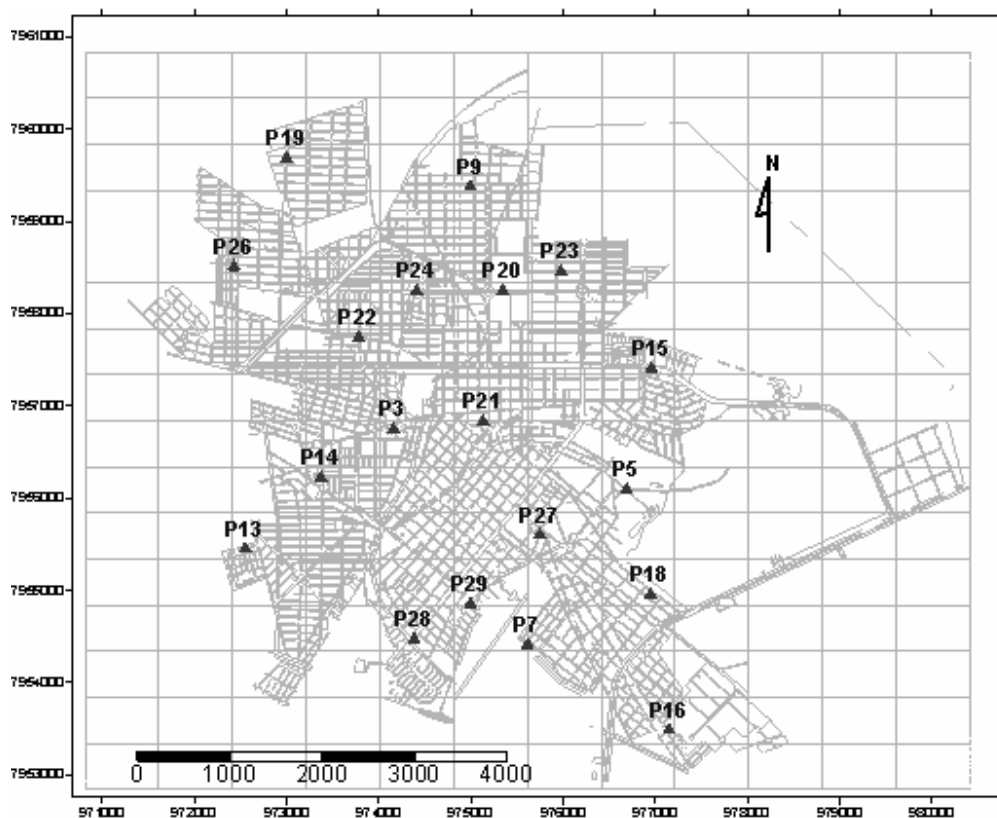


Figura 1 – Pontos utilizados no levantamento em campo da condutividade hidráulica.

2.1.2 - Procedimentos do ensaio de Infiltração em campo

Optou-se pela realização de testes de campo, com a intenção de garantir uma representatividade maior dos valores obtidos nos ensaios. O tipo de ensaio selecionado foi o ensaio de infiltração. Conforme já foi comentado, neste ensaio, é aplicada uma carga (constante), medindo-se a vazão de água injetada, necessária para manter tal nível constante. Esse ensaio não utiliza sistema de observação da variação das cargas piezométricas nas imediações do furo. Por esta razão, é conhecido como "ensaio pontual".

A metodologia do ensaio seguiu os procedimentos estabelecidos conforme a Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, ABGE (1996). Inicialmente, foram executados furos a trado sem utilização de lavagem, conforme ilustra a Figura 2.



Figura 2 – Execução do furo de sondagem a trado manual.

A parede do furo, no horizonte do solo a ser ensaiado, era então desobstruída com a raspagem por um escarificador (haste de madeira com pregos sem cabeça, parcialmente cravados). Após a abertura do furo, com profundidade de 60 cm, este era revestido com um tubo PVC (diâmetro de 6,64 cm) com o objetivo de garantir uma impermeabilização de parte do fuste do furo. Esse revestimento era colocado no furo de sondagem mediante pressão do operador, conforme ilustra Figura 3. O trecho do furo sem revestimento correspondeu a cerca de 45 cm, a partir do qual era possível a infiltração da água. Com esses procedimentos prontos, injetou-se água no tubo até que fosse garantida a saturação do terreno no entorno do trecho ensaiado, conforme Figura 4.



Figura 3 - Cravação do revestimento do tubo de PVC.



Figura 4 – Injeção de água no tubo para saturação do terreno.

No momento em que o operador não mais manuseava o registro (abertura ou fechamento), entendia-se que a vazão era praticamente constante, indicando que a região sub-superficial já estava totalmente saturada. Esse procedimento demandava cerca de 15 minutos. Em seguida, o furo era totalmente preenchido com água até a extremidade superior do tubo de PVC. A carga hidráulica utilizada no ensaio foi de 205 cm. O nível de água no furo foi, então, mantido constante, sendo alimentado pela bomba do poço que se encontrava nas proximidades do local do teste.

As medidas de volume de água, no teste de infiltração, foram feitas com um hidrômetro acoplado à mangueira da fonte de água e, em alguns casos, com o uso de uma proveta graduada. A seleção da fonte (mangueira ou proveta) levou em consideração a avaliação geral da vazão estabilizada quando do processo de saturação da região sub-superficial. Uma vez que se observava uma pequena variação temporal do volume (inferior a 1L/min), priorizava-se a realização do ensaio com a proveta, uma vez que a utilização do hidrômetro poderia não ser muito precisa (ver Figuras 5 e 6).



Figura 5 - Controle da vazão constante, realizada por hidrômetro.



Figura 6 - Controle da vazão constante, realizada por proveta.

Registrava-se, então, o volume de água introduzido a cada intervalo de tempo (1 minuto), tendo o ensaio duração total de cerca de 15 minutos. Uma vez observada que a vazão do ensaio se estabilizava, ou seja, a diferença entre as leituras não variavam muito do seu valor médio, cessava-se o ensaio.

2.1.3 - Tratamento dos dados amostrados/coletados

Em cada ensaio, foi determinada a vazão constante (Q), pela simples relação entre o volume medido e o tempo. Conseqüentemente a condutividade hidráulica (K), foi calculada conforme Equação (1), proposta pela ABGE (1996):

$$K = \frac{Q}{h} \cdot \frac{1}{C_u \cdot r} \quad (1)$$

Nessa equação empírica, os parâmetros podem ser definidos como: C_u = coeficiente empírico, Q = vazão do ensaio (L/min), h = carga hidráulica (m), r = raio do furo de sondagem (m). Com a utilização da Equação (1), a condutividade hidráulica (K) é obtida em cm/s. Para a obtenção do coeficiente empírico C_u , utilizou-se o ábaco proposto pela, ABGE (1996), ilustrado na Figura 7, de acordo com a curva estabelecida pela relação h/r e L/h , onde L é a altura do trecho ensaiado, sem revestimento. Nesse sentido, foram considerados os seguintes valores:

- h (carga hidráulica) = 205 cm;
- L (altura livre do furo) = 45 cm
- r (raio do furo de sondagem) = 3,32 cm;
- $L/h = 0,2195$
- $h/r = 61,7470$;
- C_u (coeficiente empírico) = 42 – Ábaco da ABGE (1996).

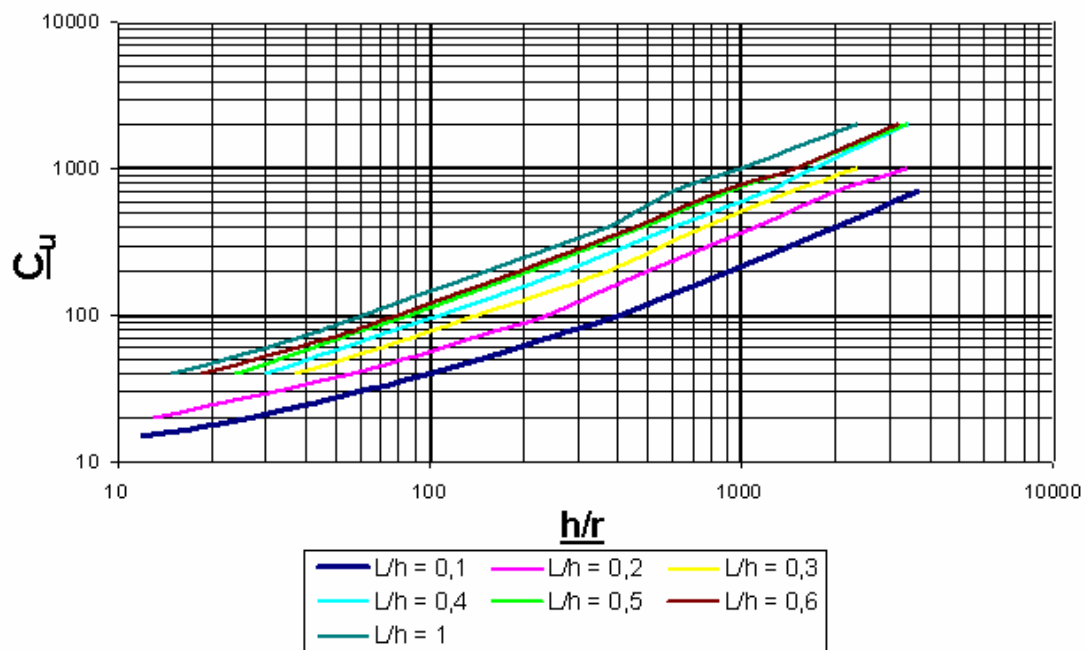


Figura 7 – Ábaco para obtenção do coeficiente empírico da Equação (1).
Fonte: ABGE (1996).

2.2 - Avaliação do uso e ocupação do solo da cidade de Araguari

Para a elaboração de um trabalho relacionado com área ambiental, também é importante o conhecimento das características físicas e sociais do local de estudo. Nesse contexto, buscou-se estudar a distribuição espacial dos elementos que compõem parte do espaço geográfico urbano do município de Araguari. Vinculado ao tema deste trabalho, o conhecimento do uso e ocupação do solo urbano permite prever setores com maior potencial poluidor, confrontando essas regiões com os valores de condutividade hidráulica superficial obtidos.

Segundo o IBGE (2007), o município analisado possui uma área total de 2.732 km². A pesquisa realizou a avaliação do uso e ocupação do solo somente na zona urbana da cidade de Araguari (delimitação espacial da pesquisa). Esse recorte espacial justifica-se, uma vez que os poços, que suprem o abastecimento público da cidade, localizam-se na zona urbana.

Para a elaboração da base cartográfica de uso e ocupação do solo da cidade de Araguari, foi utilizada uma imagem aérea IKONOS, do ano de 2004, fornecida pela Superintendência de Água e Esgoto (SAE – Araguari). O programa computacional utilizado foi o ArcGIS 9.0, desenvolvido pela empresa norte americana ESRI (*Environmental Systems Research Institute*). Especificadamente, foi utilizada a ferramenta ArcMAP, para a análise espacial do uso e ocupação do solo.

Definiram-se, segundo a Tabela 1, as seguintes categorias a serem consideradas para este estudo.

Tabela 1 – Categorias para avaliação do uso e ocupação do solo de Araguari.

Categoria	Cor
Áreas industriais	laranja
Área residencial com esgoto conectado à rede coletora	azul
Área residencial sem esgoto conectado à rede coletora	vermelho
Áreas agrícolas	roxo
Áreas verdes	verde
Cemitérios	amarelo

Muitas indústrias podem contribuir para a poluição das águas subterrâneas, com metais pesados e compostos químicos orgânicos, entre outros. As elevadas concentrações de poluentes e algumas práticas de disposição inadequadas de resíduos fazem com que atividades industriais sejam de grande preocupação ambiental. Nesse aspecto, a delimitação para áreas industriais foi considerada no estudo do uso e ocupação do solo da cidade.

Outro problema associado com a poluição do solo e, potencialmente, do lençol freático, está associado aos sistemas de saneamento sem redes de esgoto. Essa situação pode ocasionar a poluição do lençol por microorganismos de origem fecal. Algumas regiões do município de Araguari ainda apresentam essa realidade, sendo alguns bairros periféricos ainda desprovidos de rede coletora de esgoto. Nesses locais, as residências fazem uso do sistema tanque séptico-sumidouro, com disposição

final do efluente no solo. Nesse sentido, foram delimitadas áreas residenciais sem rede de esgoto conectada à rede coletora e também as áreas residenciais com rede de esgoto.

Os cemitérios normalmente geram cargas microbiológicas contaminantes em áreas restritas, podendo atingir o solo, caso não sejam tomadas medidas de controle. Em função disto, os principais cemitérios da cidade foram identificados nesta avaliação.

Para a delimitação das áreas verdes foram consideradas campos abertos, terrenos baldios, canteiros em avenidas, áreas arborizadas, bosques e áreas de preservação permanente.

As práticas agrícolas comumente são potencialmente poluidoras, devido à aplicação intensiva e prolongada de fertilizantes e agrotóxicos. Soma-se a isto, a eventual irrigação excessiva do solo, que contribui com o arraste e infiltração de nutrientes (especialmente nitratos), conforme destaca Silva (2003). Assim, a categoria “áreas agrícolas” também foi delimitada neste estudo.

A interpretação da imagem área IKONOS envolveu a identificação dedutiva das áreas previamente estabelecidas, bem como o significado de uso e ocupação do solo, desenvolvido através dos elementos mais significativos desta interpretação que foram consideradas como estrutura, forma e tonalidade dos componentes da imagem.

3– RESULTADOS

3.1 - Uso e ocupação do solo

Com o uso da ferramenta ArcMap, delimitou-se o perímetro urbano, para a definição da área de estudo, aproximadamente 67 Km². Definidas as categorias a serem consideradas para este estudo e, com o uso da ferramenta que calcula a área de cada polígono no ArcMap, foi possível levantar as frações de área de cada categoria, as quais são listadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Estudo do uso e ocupação do solo da cidade de Araguari: áreas de cada categoria.

Categoria	Cor	Área (Km²)
Áreas industriais	laranja	0,157
Áreas residenciais com rede de esgoto	azul	14,625
Áreas residenciais sem rede de esgoto	vermelho	7,254
Áreas agrícolas	roxo	22,045
Áreas verdes	verde	22,819
Cemitérios	amarelo	0,068
Área total do estudo:		66,968

Como resultado, foi gerado um mapa (Figura 8) que ilustra as delimitações dos respectivos usos do solo da cidade de Araguari.

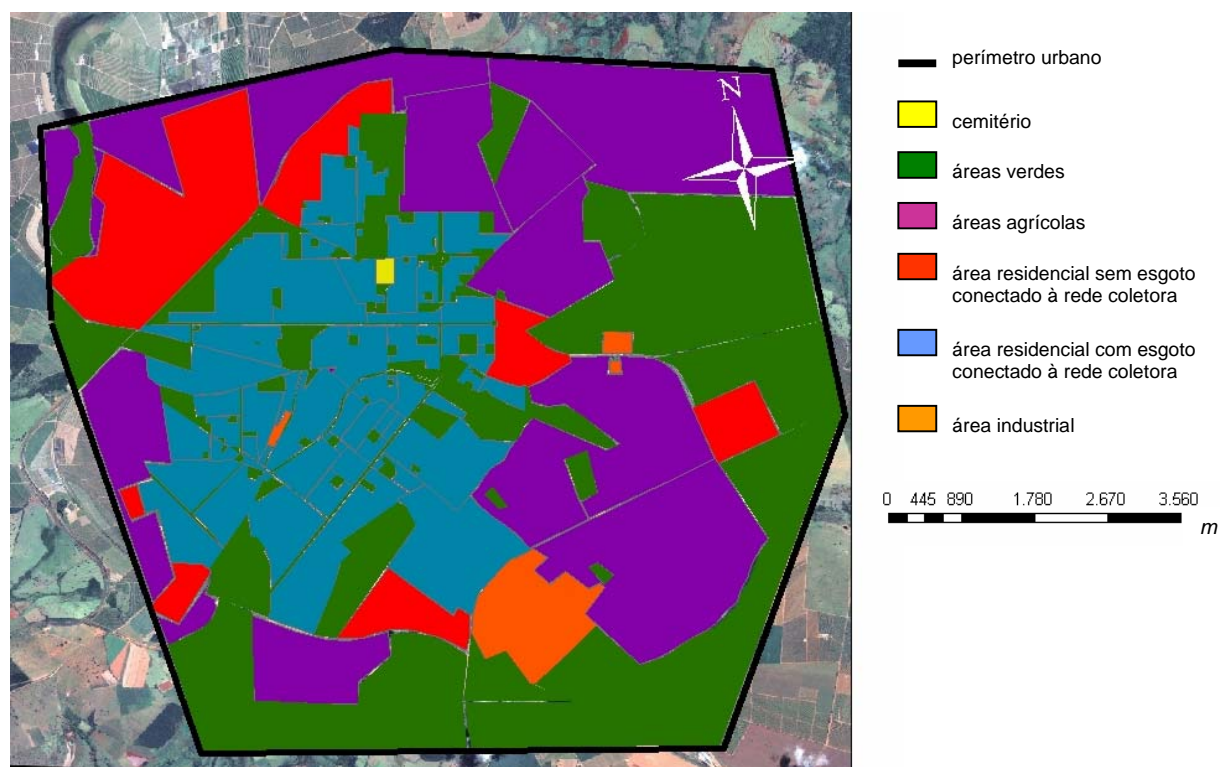


Figura 8 – Mapa de uso e ocupação do solo da cidade de Araguari.

3.2 - Condutividade hidráulica (K)

Os valores de condutividade hidráulica da formação superficial, calculados para cada ponto ensaiado, encontram-se detalhados na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores da condutividade hidráulica da formação superficial.

Localização	Identificação	Vazão constante do ensaio (cm ³ /s)	Condutividade hidráulica (K) (cm/s)	Condutividade hidráulica (K) (m/d)
Bateria Fátima	P3	6,02E+00	2,32E-03	2,01
Contingente	P29	5,34E+01	2,06E-02	17,79
Walter Santiago	P9	1,75E+02	6,74E-02	58,23
Poço Madri	P13	3,02E+00	1,16E-03	1,01
Poço Chancia P1	P14	3,20E+01	1,23E-02	10,66
Poço da Theodoreto	P15	6,17E+00	2,38E-03	2,06
Lagoa Seca	P16	4,80E+00	1,85E-03	1,60
José de Belém	P18	2,69E+01	1,04E-02	8,96
Vieno	P19	3,91E+01	1,51E-02	13,03
Poço da Exposição	P20	3,16E+01	1,22E-02	10,52
Ginásio	P21	5,58E+01	2,15E-02	18,60
Araras	P22	4,45E+01	1,71E-02	14,81
R. Tupaciguara	P23	8,68E+00	3,35E-03	2,89
Conj Mauá (Poço Jaca)	P26	7,15E+01	2,76E-02	23,82
Praça Jardim Regina	P27	1,41E+02	5,42E-02	46,81
Av. Batalhão Mauá	P28	8,15E+01	3,14E-02	27,14
Poço R. Goiás	P7	6,89E+01	2,66E-02	22,95
Chácara Fernando	P5	1,81E+01	6,97E-03	6,02
Bat. Indep. P4	P24	7,76E+01	2,99E-02	25,84

Com os valores de condutividade hidráulica nos 19 pontos amostrados, fez-se o uso do método de Kriging para a interpolação dos valores para toda a zona urbana. As iso-linhas de condutividade hidráulica são ilustradas pela Figura 9.

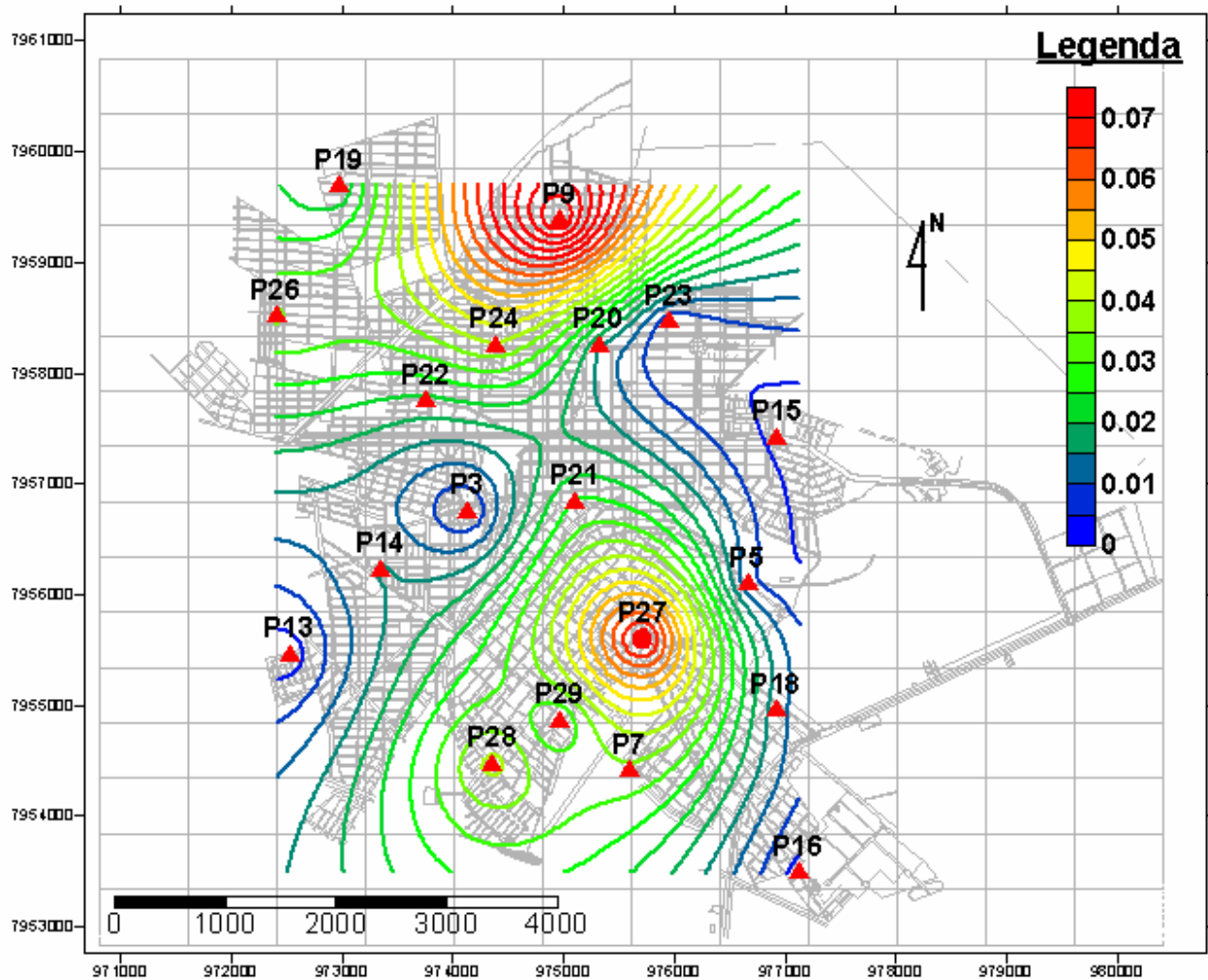


Figura 9 – Iso-linhas de condutividade hidráulica da formação superficial (valores em cm/s).

Em termos locais, a melhor maneira de avaliar os valores encontrados, é comparando os mesmos nos diferentes pontos da cidade. Para isto, as condutividades hidráulicas foram normalizadas, ou seja, utilizaram-se valores adimensionais para representá-las. Os valores adimensionais são os resultados das relações entre as condutividades, encontradas em cada ponto, pelo valor máximo encontrado ($6,74 \cdot 10^{-2}$ cm/s, P9 da Walter Santiago). A Tabela 4 detalha os respectivos valores adimensionais das condutividades hidráulicas normalizadas nos pontos ensaiados.

Tabela 4 – Valores da condutividade hidráulica da formação superficial.

Localização	Identificação	Condutividade hidráulica normalizada (%)
Bateria Fátima	P3	3,44
Contingente	P29	30,55
Walter Santiago	P9	100,00
Poço Madri	P13	1,73
Poço Chancia P1	P14	18,31
Poço da Theodoreto	P15	3,53
Lagoa Seca	P16	2,75
José de Belém	P18	15,39
Vieno	P19	22,37
Poço da Exposição	P20	18,07
Ginásio	P21	31,94
Araras	P22	25,44
R. Tupaciguara	P23	4,97
Conj Mauá (Poço Jaca)	P26	40,91
Praça Jardim Regina	P27	80,39
Av. Batalhão Mauá	P28	46,60
Poço R. Goiás	P7	39,41
Chácara Fernando	P5	10,35
Bat. Indep. P4	P24	44,38

A Figura 10 representa os valores normalizados de condutividade hidráulica, permitindo comparações mais diretas entre suas magnitudes e uma análise mais simplificada acerca dos setores da cidade onde a percolação de poluentes seria, teoricamente, mais facilitada.

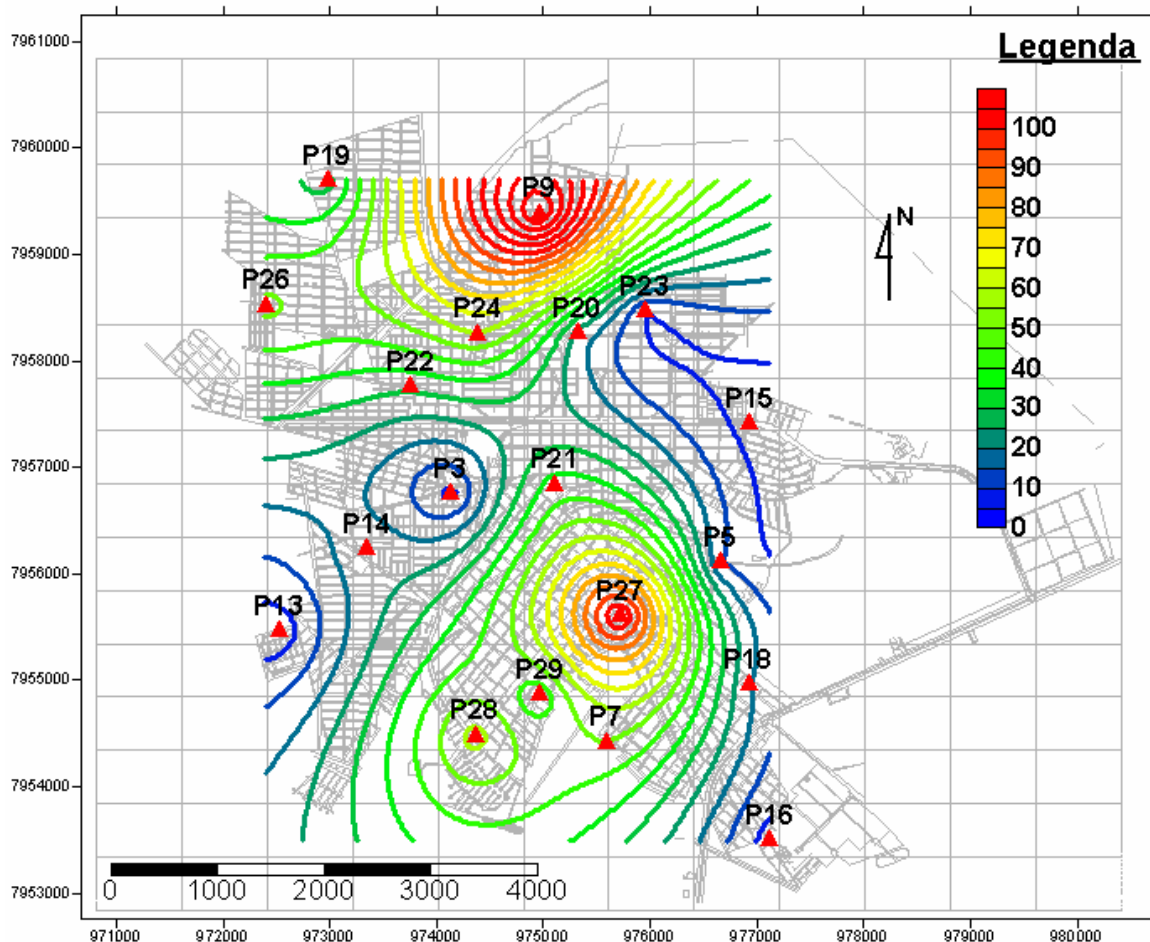


Figura 10 – Iso-linhas de condutividade hidráulica normalizada (valores percentuais).

4- CONCLUSÕES

O ponto P9 (Poço da Walter Santiago), situado ao norte da cidade, encontra-se localizado em uma região carente de conexão de esgoto à rede coletora, conforme ilustra a Figura 8 (mapa de uso e ocupação do solo). Especial atenção deve ser dada a esta região uma vez que o valor de condutividade hidráulica é elevado, em relação às outras regiões da cidade. Os pontos P19, P26, P15 e P7 (Poço Vieno, Conjunto Mauá, Poço da Theodoretto e Poço da R. Goiás), também encontram-se inseridos em uma região desprovida esgoto conectado à rede coletora. Apesar disto, essa região apresenta valores menores de condutividade hidráulica, de 10% a 40% da máxima local.

O ponto P27 (Poço da Praça Jardim Regina), apesar de se encontrar em uma região provida de esgoto conectado à rede coletora, apresentou elevada condutividade hidráulica (80,39%) do valor máximo local. Tomando por base apenas o uso do solo, os riscos poluidores nessa região são menores do que aqueles situados ao norte da cidade, nas proximidades do ponto P29.

As áreas industriais são sempre preocupantes uma vez são freqüentes as práticas de disposição inadequadas de resíduos, além disto, as concentrações de poluentes são mais elevadas. Em Araguari, a maior concentração de indústrias (Centro Industrial) ocorre próxima ao ponto P16 (Poço da Lagoa Seca). Apesar disto, a região apresentou baixos valores adimensionais de condutividade hidráulica superficial.

As áreas verdes encontram-se distribuídas em toda a área urbana. Nesse sentido, é importante alertar e incentivar a preservação das áreas verdes localizadas próximas aos pontos P27 e P9 (Praça Jardim Regina e Walter Santiago), pois, nessas regiões, os valores de condutividade hidráulica são mais elevados. Assim, um poluente disposto no solo dessas regiões teria maior tendência de percolar pela formação superficial.

O cemitério da cidade, encontra-se em uma região de baixa condutividade hidráulica superficial, cerca de 25% da máxima. Da mesma forma, as áreas agrícolas, situadas na periferia da zona urbana da cidade, apresentaram valores não muito elevados de condutividade hidráulica, de 10% a 45%. Apesar disto, o uso de fertilizantes e defensivos agrícolas é uma atividade potencialmente poluidora. Nesse aspecto, chama-se atenção para a necessidade de um monitoramento mais freqüente da qualidade da água dos poços próximos a essas áreas agrícolas.

Diante do exposto, alerta-se que a manutenção da qualidade da água do sistema aquífero Bauru em Araguari, está vinculada à implementação de dispositivo legal que regulamente o uso e ocupação do solo, bem como o zoneamento urbano.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem pelo apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao apoio técnico da Superintendência de Água e Esgoto de Araguari (SAE) e da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia.

BIBLIOGRAFIA

AUGE, M. Vulnerabilidad de Acuíferos, Conceptos y Métodos. Universidade de Buenos Aires. 2004.

ABGE. Ensaio de Permeabilidade em Solos – Orientação para sua execução no campo. São Paulo. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1996.

FOSTER, S.S.D.A; HIRATA, R.C.A. Riscos de poluição de águas subterrâneas; uma proposta de avaliação regional, São Paulo: ABAS, 1988.

Fundação IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2007. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>> ; Acesso em: Abril de 2008.

SILVA, R. B. G. Água subterrânea: um valioso recurso que requer proteção. São Paulo; DAAE, 2003.