

DELIMITAÇÃO DE ZONAS DE CAPTURA ATRAVÉS DE MODELAGEM COMPUTACIONAL DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DE ZONAS URBANAS

Stella Rodrigues Ferreira^{1}; Renata Ribeiro da Silva Ramos²; José Eduardo Alamy Filho^{3*}; Nágela Aparecida de Melo^{4*}*

Resumo – O presente trabalho visa à estimativa das trajetórias de partículas em direção a poços que extraem águas subterrâneas do aquífero livre Bauru, situado sob a zona urbana de Araguari, Minas Gerais. Os procedimentos basearam-se no conhecimento da distribuição da superfície freática, no cálculo das velocidades de percolação e das posições das partículas ao longo de tempos que precedem sua chegada aos poços. As zonas de captura foram traçadas como envoltórias que abrangem os diversos percursos em direção aos poços. Os percursos foram calculados para poços cujas amostras de água apresentaram os maiores teores de Nitrato, DBO₅ e Sólidos Voláteis. A superposição das zonas de captura com mapas de uso predominante do solo e de vulnerabilidade intrínseca do aquífero constitui ferramenta auxiliar para identificação de eventuais fontes poluidoras. No caso deste estudo, os resultados sugerem que vazamentos nas redes de esgoto, ou em fossas sépticas domiciliares, devem ser as principais causas do aporte de substâncias aos poços, mesmo que as concentrações encontradas ainda estejam abaixo dos limites estabelecidos pela legislação vigente.

Palavras-Chave – Águas subterrâneas, poços, trajetórias de partículas

DELIMITATION OF WELL CAPTURE ZONES USING COMPUTATIONAL MODELING OF GROUNDWATER IN URBAN AREAS

Abstract – This study aims to estimate particle paths toward the wells that extract groundwater from the Bauru aquifer, situated under the urban area of Araguari, Minas Gerais. The procedures were based on knowledge of distribution of the water table, in calculating the velocities and the positions of percolating particles along their arrival times prior to the wells. The capture zones were plotted as envelopments covering the various paths towards the wells. The paths were calculated for wells whose water samples showed the highest levels of nitrate, BOD₅ and Volatile Solids. The superposition of the capture zones with maps of soil predominant use and with intrinsic vulnerability of the aquifer is an auxiliary tool to identify possible pollution sources. In the case of this study, the results suggest that leaking sewer lines or septic tanks should be the main causes of the contribution of substances to the wells, even though the concentrations found are still below the limits established by law.

Keywords – Groundwater, wells, particle paths

¹ Afiliação: Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Graduanda em Engenharia Ambiental, stellarf@hotmail.com

² Afiliação: Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Graduanda em Geografia, renataribeiroramos@ig.com.br

³ Afiliação: Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Professor da Faculdade de Engenharia Civil, zealamy@yahoo.com.br

⁴ Afiliação: Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Professora da Faculdade de Engenharia Civil, nagelamelo@hotmail.com

* Autores correspondentes

INTRODUÇÃO

Em zonas urbanas, verifica-se que há concentrações de atividades e de agentes potencialmente poluidores das águas subterrâneas, como indústrias, postos de gasolina, cemitérios, fossas sépticas, aterros sanitários e redes de esgoto passíveis de vazamentos, entre outros. Além disto, em setores periféricos das cidades, é comum a presença de atividades agrícolas que podem contribuir para o afluxo difuso de poluentes como nitrato, fosfato e pesticidas. Quando as cidades utilizam a água subterrânea para abastecimento, sua extração é feita por poços tubulares perfurados dentro da própria malha urbana. Nesse sentido, as vazões extraídas dos poços contribuem para alterações nos níveis de pressão da água dentro do manancial subterrâneo. Tais perturbações induzem o surgimento de gradientes de pressão mais elevados na vizinhança dos poços, fator que tende a ampliar as velocidades do escoamento dentro da formação porosa, além de direcionar o fluxo para estes pontos de extração. Assim, quando um poluente atinge o aquífero, seu transporte até os poços pode ocorrer de forma mais acelerada, caso a pluma alcance as chamadas zonas de captura, dentro das quais os poluentes apresentarão tendência de transporte em direção aos pontos de extração de água.

Embora a delimitação das zonas de captura esteja relacionada com o cálculo dos cones de depressão, estas estimativas nem sempre são diretas para aquíferos reais, uma vez que a heterogeneidade das propriedades hidrogeológicas dos mananciais atuam como empecilhos para aplicação de equações analíticas de previsão. Estas variações espaciais nas propriedades do meio acabam direcionando as previsões para metodologias numéricas, que utilizam equações diferenciais e programação computacional.

O objetivo primordial deste trabalho reside na estimativa das trajetórias de partículas carreadas passivamente pelo escoamento subterrâneo no aquífero livre Bauru, considerando alguns poços do sistema de abastecimento de água da cidade de Araguari, Minas Gerais. Neste caso, além de auxiliar na delimitação das zonas de captura, o mapeamento das trajetórias permite estimar os tempos de percurso de eventuais poluentes até os poços. Assim, é possível prever, de forma aproximada, o tempo que um determinado poluente, ao alcançar uma zona de captura, leva para atingir um poço e poluir a água destinada ao abastecimento. Indiretamente, o modelo aqui apresentado pode atuar como uma ferramenta para proteção de poços, impedindo a fixação de empreendimentos potencialmente poluidores do solo dentro das zonas de captura.

METODOLOGIA

A base matemática deste estudo consiste na estimativa das velocidades de percolação da água subterrânea, considerando uma distribuição previamente conhecida de carga hidráulica (h) no aquífero. Este cálculo pode ser feito a partir da Lei de Darcy, conforme as Equações (1) e (2):

$$V_x = -K_x \cdot \left(\frac{dh}{dx} \right) / S_y \quad (1)$$

$$V_y = -K_y \cdot \left(\frac{dh}{dy} \right) / S_y \quad (2)$$

As componentes de velocidade nas direções horizontais x e y , respectivamente escritas como V_x e V_y , são fundamentais para o cálculo da trajetória de partículas dentro do aquífero. Nas referidas equações, os termos K_i , com $i = x, y$, representam as condutividades hidráulicas nas diferentes

direções. O termo S_y representa o rendimento específico do aquífero, cujo valor é equivalente à porosidade efetiva da formação.

A superfície piezométrica tomada como base foi simulada por Miranda (2012), considerando o bombeamento de todos os poços do sistema de abastecimento da cidade de Araguari (MG) e uma malha de discretização cartesiana. Nesse contexto, os valores de carga hidráulica foram armazenados nos pontos nodais da referida malha, bem como as velocidades de percolação, que foram calculadas pelas Equações (1) e (2). Esta simulação buscou uma situação próxima do regime permanente, no qual o bombeamento do sistema de poços não mais trazia variações significativas na carga hidráulica do aquífero. Evidentemente que esta situação pode ser perturbada pela operação de novos poços introduzidos no sistema, ou mesmo pelo desligamento das bombas de alguns poços. Como estes fatores são de difícil previsibilidade, eles não foram abordados nesta análise. A superfície piezométrica utilizada para a situação de regime permanente é ilustrada pela Figura 1.

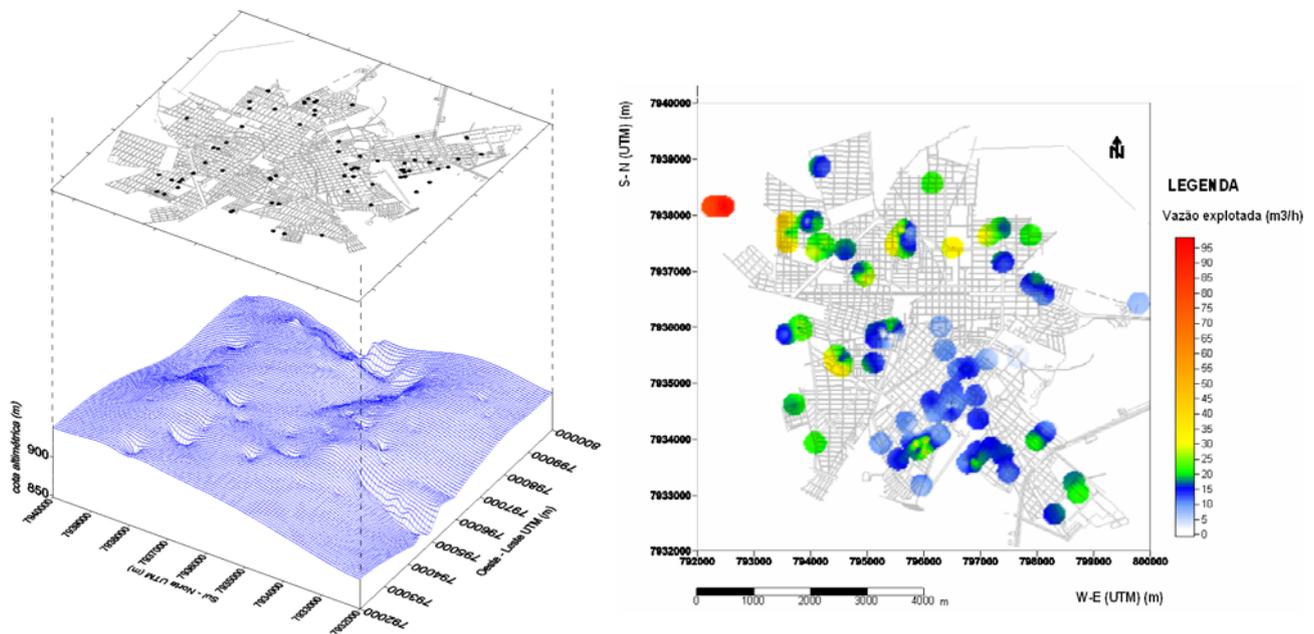


Figura 1 – Superfície piezométrica para o aquífero Bauru subjacente à cidade de Araguari (MG). Representação da condição simulada de regime permanente e distribuição das vazões exploradas pelo sistema de poços.

As Equações (3) e (4) foram utilizadas para calcular as posições de partículas, transportadas passivamente pelo escoamento subterrâneo, para um instante $t + \Delta t$, a partir do conhecimento de suas posições no instante t :

$$x(t + \Delta t) = x(t) + \hat{V}_x(t) \cdot \Delta t \quad (3)$$

$$y(t + \Delta t) = y(t) + \hat{V}_y(t) \cdot \Delta t \quad (4)$$

Nas Equações (3) e (4), $\hat{V}_x(t)$ e $\hat{V}_y(t)$ representam velocidades da partícula, no instante t , para uma posição x, y que não é exatamente coincidente com as posições dos nós da malha de discretização. Portanto, um procedimento de interpolação espacial deve ser adotado para calcular as velocidades \hat{V} . Para este propósito, foi utilizada uma função *Kernel* triangular, no qual a velocidade da partícula é estimada a partir dos valores das velocidades nos quatro nós mais próximos da malha de discretização. A ligação entre posições consecutivas fornece a trajetória de uma partícula dentro do aquífero. As trajetórias calculadas descrevem, na realidade, alterações nas

posições de partículas de água, permitindo estimar seu tempo de trânsito desde um ponto de origem até o poço mais próximo. A rigor, os tempos de trânsito dos poluentes tendem a ser maiores, em decorrência de mecanismos atenuadores presentes no meio poroso, como a adsorção e a biodegradação.

Neste trabalho utilizaram-se 20 partículas por poço, as quais foram inicialmente distribuídas de forma radial a estes pontos de extração de água. Dessa forma, com passos de tempo regressivos (negativos), foram calculadas as posições das partículas em diversos instantes anteriores à sua chegada aos poços, permitindo delimitar suas zonas de captura. Neste contexto, a sequência de cálculos foi organizada por um algoritmo e codificada em linguagem *Visual Basic* aplicada ao *Excel*.

O critério de seleção dos poços baseou-se nos resultados das análises de qualidade de amostras de água coletadas em 68 unidades. Nesse contexto, as zonas de captura foram simuladas para os poços que apresentaram os piores indicadores referentes às concentrações de Nitrato, DBO_5 e Sólidos Voláteis.

O Nitrato é um parâmetro utilizado mundialmente como indicador de poluição das águas subterrâneas. Concentrações elevadas sugerem poluição por disposição inadequada de esgotos domésticos, industriais, além do uso excessivo de fertilizantes nitrogenados na agricultura. Para a CETESB, concentrações de nitrogênio-nitrato acima de 5 mg/L já indicam alteração no equilíbrio natural do meio. Este valor geralmente é adotado como um índice preventivo. Teores que ultrapassam 10 mg/L, valor estabelecido como padrão de potabilidade, já evidenciam um cenário de poluição da água. A demanda bioquímica de oxigênio (DBO) é um parâmetro fundamental na caracterização de esgotos sanitários. A presença de DBO elevada em amostras de água indica a poluição por despejos biodegradáveis, cuja origem é predominantemente orgânica. Os Sólidos Voláteis também estão associados com a presença de compostos orgânicos nas águas.

RESULTADOS

Com base no critério de seleção descrito no item anterior, as Figuras 2 a 4 ilustram a localização dos poços, bem como as trajetórias de partículas para eles direcionadas. As simulações consideraram trajetórias para tempos precedentes de 5 e 20 anos.

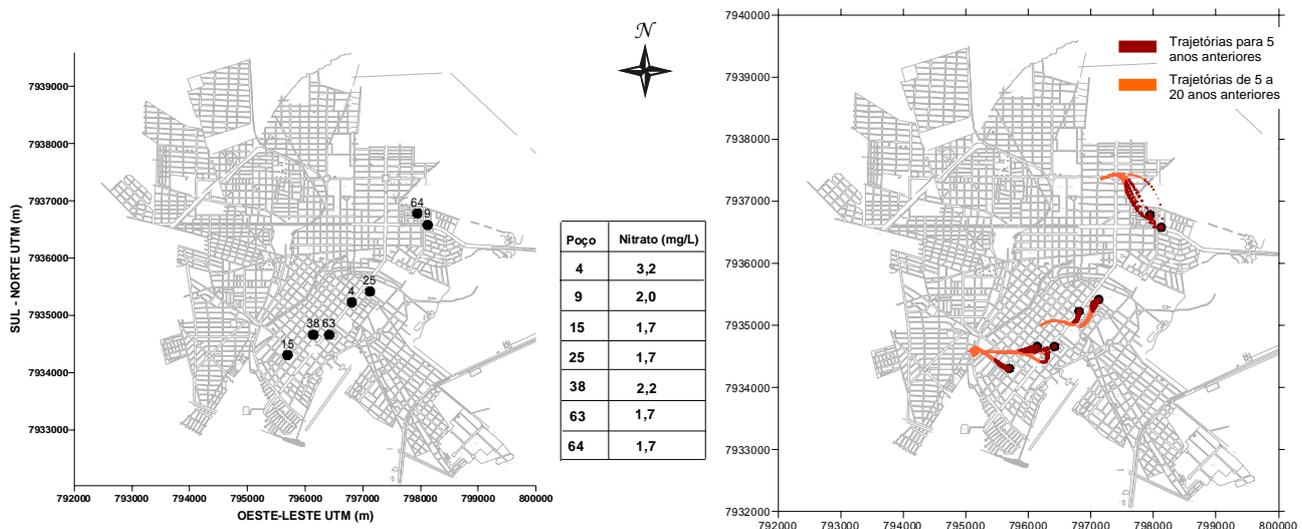


Figura 2 – Poços com as maiores concentrações de Nitrato e trajetórias de partículas, delineando percursos para tempos progressos de até 20 anos

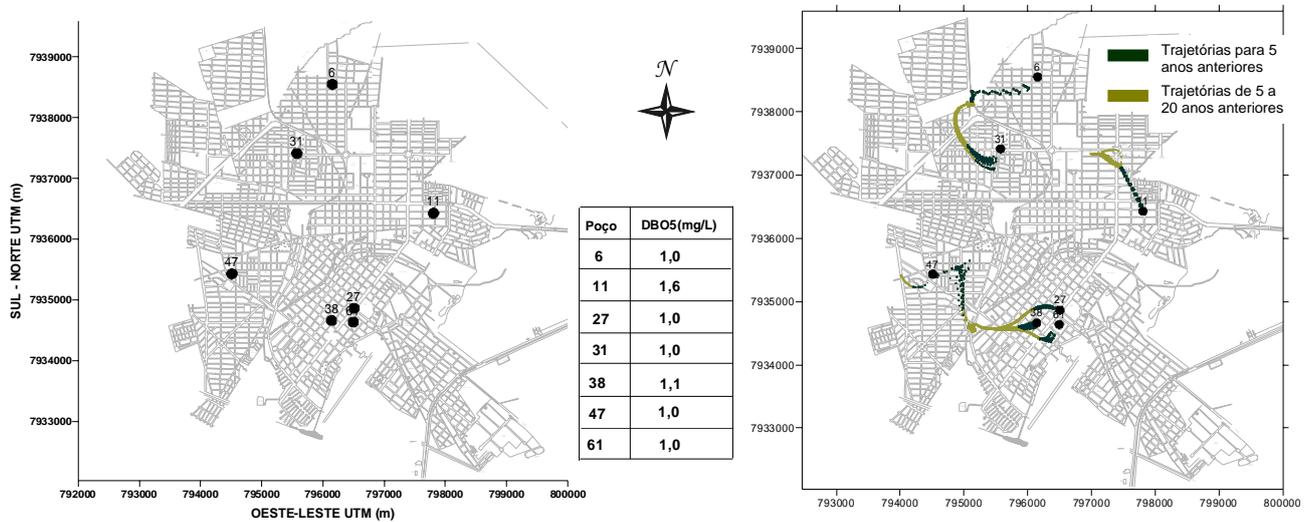


Figura 3 – Poços com as maiores concentrações de DBO₅ e trajetórias de partículas, delineando percursos para tempos progressos de até 20 anos

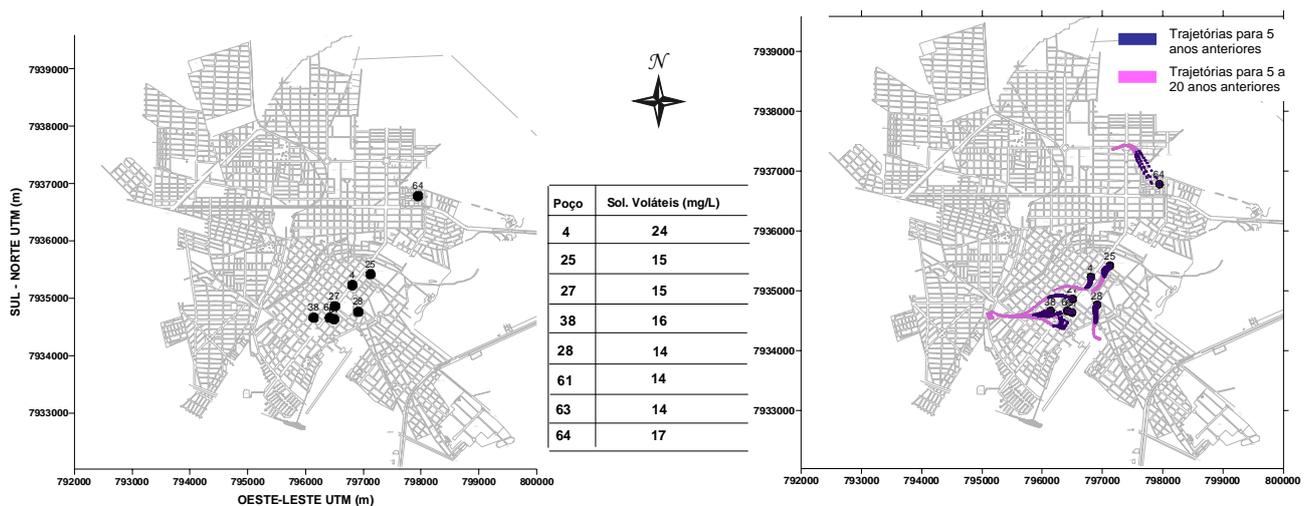


Figura 4 – Poços com as maiores concentrações de Sólidos Voláteis e trajetórias de partículas, delineando percursos para tempos progressos de até 20 anos

Nas Figuras 2 a 4, apenas o Poço 38 apresenta repetição para os três parâmetros analisados. Quando apenas os parâmetros Nitrato e Sólidos Voláteis são levados em conta, percebe-se que há repetições para uma quantidade maior de unidades, incluindo-se os Poços 4, 28, 38, 63 e 64. De fato, considerando a rede total de amostragem nos 68 poços, notam-se que as correlações mais significativas ocorrem entre as concentrações de Nitrato e de Sólidos Voláteis. Isto atua como um indicador de que estas duas substâncias podem ser originárias da mesma fonte. A Figura 5 ilustra gráficos de dispersão, com as indicações dos coeficientes de correlação (R) entre os pares de parâmetros analisados.

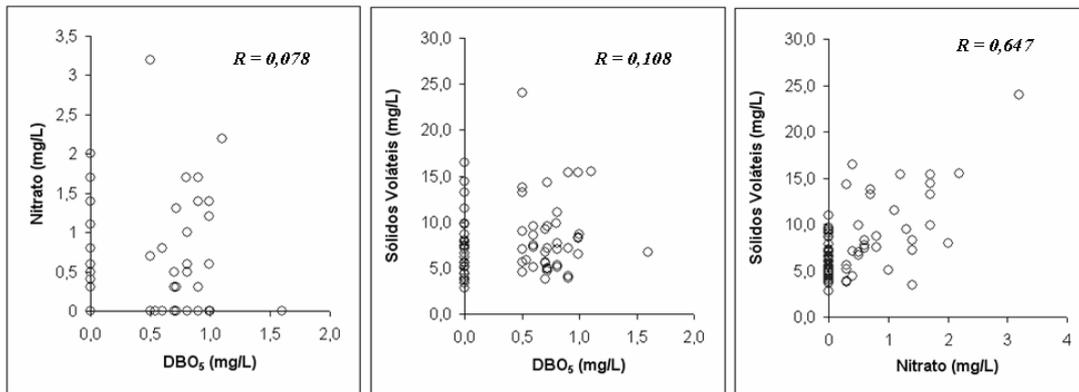


Figura 5 – Gráficos de dispersão e coeficientes de correlação entre pares de parâmetros de qualidade da água

A estimativa das trajetórias de partículas em direção aos poços permite traçar envoltórias que correspondem às suas zonas de captura. Quando a delimitação dessas zonas é realizada em conjunto com o levantamento do uso do solo ou com mapas de vulnerabilidade intrínseca do aquífero, criam-se condições para a identificação de possíveis fontes poluidoras. A Figura 6 ilustra as zonas de captura para os Poços 4 e 64, bem como os usos predominantes do solo nas quadras interceptadas pelas trajetórias.

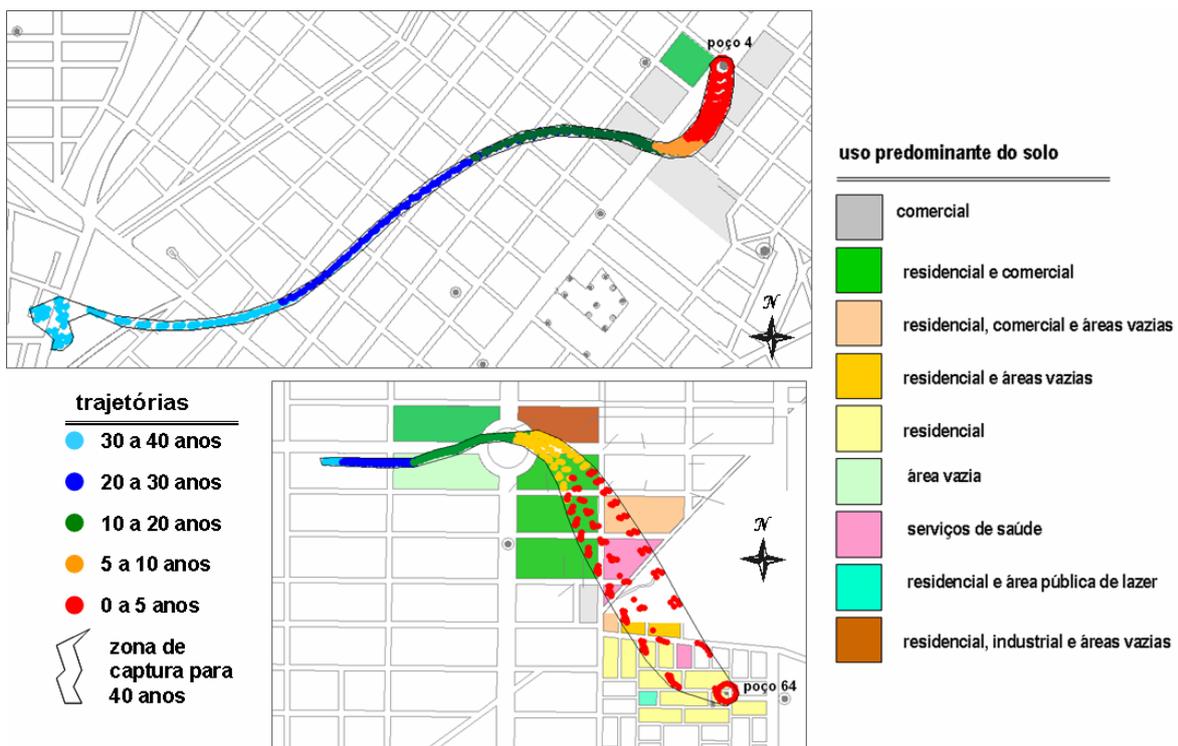


Figura 6 – Trajetórias de partículas para diversos tempos precedentes, envoltórias para 40 anos e uso predominante do solo nas zonas de captura dos poços 4 e 64

Verificou-se que o Poço 4, tem zona de captura de até 10 anos ocupada por usos principalmente comerciais e também por usos residenciais. Para tempos precedentes maiores que 10 anos, esta zona de captura estende-se acentuadamente para setores distantes do poço, mas sempre inserida em área totalmente ocupada. As quadras interceptadas por esta zona de captura estão

servidas por sistema de esgotamento sanitário ligado à rede geral, bem como possuem serviços de limpeza urbana, coleta de lixo e abastecimento de água tratada. Não houve constatação explícita de nenhum estabelecimento poluidor da água subterrânea, considerando as atividades de comércio e serviços.

A zona de captura do Poço 64 é constituída por áreas loteadas ocupadas e não ocupadas. De forma geral, nas áreas edificadas, predomina o uso residencial. Nessas regiões, mesmo para trajetórias inferiores a 5 anos, houve uma lacuna de tempo entre a ocupação e a instalação da rede pública coletora de esgotos. Durante este intervalo, a destinação final dos efluentes líquidos domésticos baseou-se no sistema de fossa seguida por sumidouros que propiciavam a infiltração dos esgotos no solo. Esta pode ser uma explicação para os índices que indicam a presença de Nitrato e Sólidos Voláteis nas amostras.

A despeito disto, quando as trajetórias são confrontadas com o mapa de vulnerabilidade intrínseca do aquífero (Figura 7), a zona de captura do Poço 64 insere-se num setor de baixa vulnerabilidade, segundo o critério DRASTIC. No caso do Poço 4, a zona de captura estende-se para setores de vulnerabilidade moderada, a partir de tempos precedentes de aproximadamente 15 anos, chegando muito próxima de um setor onde o aquífero apresenta alta susceptibilidade natural à poluição.

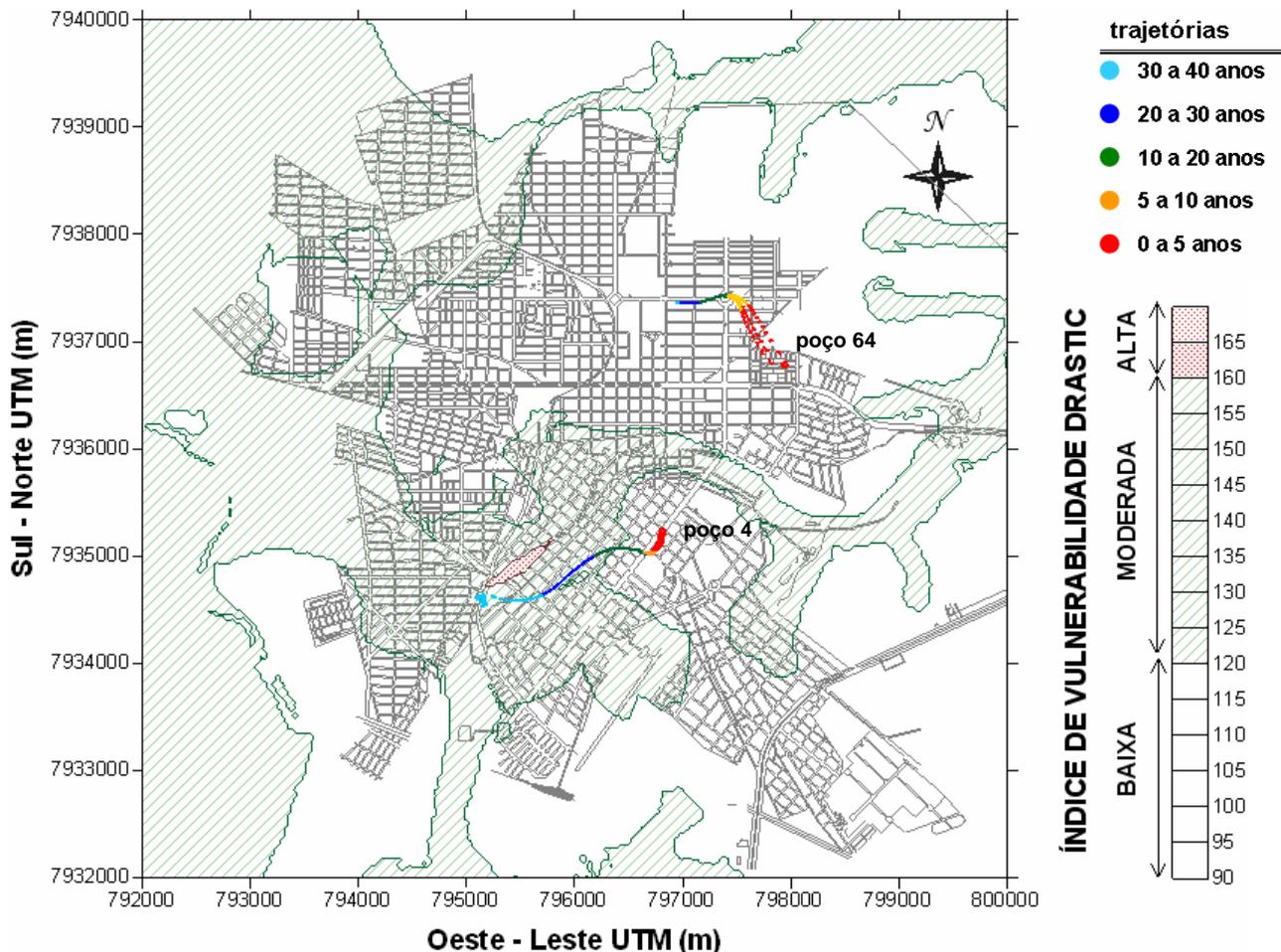


Figura 7 – Mapa de vulnerabilidade intrínseca do aquífero e trajetórias de partículas em direção aos Poços 4 e 64

CONCLUSÕES

A simulação de campos de velocidade de percolação, a partir de níveis piezométricos conhecidos, permite o cálculo do percurso de partículas transportadas passivamente pelo escoamento até os poços que retiram água para abastecimento. A delimitação de envoltórias que englobam as posições estimadas das partículas, atua como uma ferramenta para proteção de poços, impedindo a fixação de empreendimentos potencialmente poluidores do solo dentro das zonas de captura.

Comparações entre os levantamentos de uso do solo e as trajetórias das partículas revelaram que as substâncias, direcionadas aos Poços 4 e 64, originam-se de áreas predominantemente residenciais e comerciais com rede de esgoto implantada. Isto dá a entender que, vazamentos nas redes coletoras, bem como nas fossas sépticas domiciliares, constituem fontes potenciais de risco para as águas subterrâneas locais. Os resultados das análises de qualidade da água e as simulações das trajetórias das partículas em direção a uma quantidade maior de poços sugerem que vazamentos de esgoto, principalmente quando ocorrem em setores cujos índices de vulnerabilidade natural são mais elevados, podem ser a causa da presença de substâncias como Nitrato e Sólidos Voláteis em alguns poços. Apesar dessas concentrações ainda serem inferiores aos limites estabelecidos pela legislação vigente, estas constatações trazem um alerta para a importância de se monitorar frequentemente a qualidade da água subterrânea extraída para o abastecimento da população da cidade.

Sugere-se atenção específica para atividades geradoras de resíduos desenvolvidas na área urbana da cidade e para as condições e idade das tubulações das redes de esgoto sanitário. Como há usos comerciais na região, é importante que seja realizado o licenciamento de fontes potencialmente poluidoras. Aliás, esta última observação é válida para setores onde as zonas de captura abrangem usos comerciais e, principalmente, industriais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPEMIG pelo apoio financeiro ao projeto que visou ao estudo das águas subterrâneas subjacentes à cidade de Araguari (MG). Agradecimentos adicionais são feitos ao CNPq, pela concessão de bolsas de Iniciação Científica para as duas primeiras autoras deste trabalho.

REFERÊNCIAS

MIRANDA, M.C. (2012). Modelagem e simulação do escoamento em aquíferos livres sotopostos a zonas urbanas. 2012. 104 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia.