

AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE NATURAL À POLUIÇÃO UTILIZANDO O ÍNDICE DRASTIC EM ÁREA SELECIONADA NA CIDADE DE LONDRINA (PR)

EVALUATION OF NATURAL VULNERABILITY TO CONTAMINANTS APPLYING DRASTIC INDICES IN A SELECTED AREA IN LONDRINA, PARANÁ STATE

Maurício Moreira dos Santos¹; Maria Rita Caetano-Chang²; Chang Hung Kiang² e André Celligoi³

Recebido em: 20/06/2005; aceito em: 18/04/2006

RESUMO A caracterização da susceptibilidade do meio ambiente à poluição fornece subsídios quanto ao uso e à ocupação do solo e, conseqüentemente, ao planejamento sócio-econômico. Os índices de vulnerabilidade, por sua vez, constituem ferramenta útil para tomada de decisões que visem a proteção da qualidade das águas subterrâneas, dadas as limitações técnicas e principalmente econômicas para remediar a contaminação existente. Utilizando-se de dados hidrogeológicos em área selecionada na cidade de Londrina (PR), foi realizada avaliação da vulnerabilidade natural do aquífero freático constituído pelo manto de alteração das rochas basálticas da Formação Serra Geral, através da aplicação do índice DRASTIC. Este método possui características de simplicidade, baixo custo, fácil aplicação e é amplamente utilizado em estudos de vulnerabilidade natural. O manto de alteração de origem basáltica é formado principalmente por argilas-siltosas, o que garante certa proteção ao aquífero, porém grande parte dos poços atravessa material constituído por basaltos alterados (saprolito) muito fraturados, o que favorece o fluxo subterrâneo. Os ensaios de *slug*, na zona saturada, indicaram condutividade hidráulica de 213,4 a 25,6 m/d, apresentando média ao redor de 110,4 m/d. Em geral, na área de estudo, predomina vulnerabilidade moderada, enquanto nas proximidades do ribeirão Lindóia e nos divisores d'água, as vulnerabilidades foram classificadas como alta e baixa, respectivamente.

Palavras chave: vulnerabilidade natural; índice DRASTIC; aquífero freático.

ABSTRACT The characterization of environmental susceptibility to pollution is fundamental for decision making on land use and occupation. The vulnerability indices constitute useful tools to help protecting the quality of the groundwater, given the technical and economic limitations to remediate the existing contamination. The DRASTIC index was used here to evaluate the natural vulnerability of aquifer constituted by the weathered basaltic rocks of the Serra Geral Formation. The DRASTIC method was chosen in this evaluation for its simplicity, low cost, easy application and because it has been widely used for analysis of the natural vulnerability. The weathered layers of basalt consist of silt-clay, providing aquifer protection. However, a large number of wells crosses extremely fractured weathered basalts (saprolite), favoring groundwater flow. Hydraulic conductivity obtained from slug tests range from 213,4 to 25,6 m/d, averaging 110,4 m/d. In general, the vulnerability of the studied area can be classified as moderate, while that in the water divide region and in the vicinity of ribeirão Lindóia are ranked low and high, respectively.

Keywords: natural vulnerability; DRASTIC index; freatic aquifer.

INTRODUÇÃO

As atividades antrópicas ligadas ao processo desenvolvimentista provocam sérios impactos ao meio ambiente, especialmente em áreas urbanizadas. Os estudos focados na preservação ambiental, na atualidade, preocupam-se cada vez mais com a proteção dos recursos hídricos, em especial os subterrâneos. Neste contexto, os índices de vulnerabilidade constituem ferramenta útil para tomada de decisões que visem a proteção da qualidade dos recursos hídricos subterrâneos, uma vez que a gestão das águas subterrâneas apresenta limitações técnicas e principalmente econômicas quando trata de remediação de contaminação.

A necessidade de aprofundar os conhecimentos sobre a vulnerabilidade de aquíferos na zona urbana de Londrina, conduziu ao estudo de parâmetros de vulnerabilidade para área selecionada em sua parte norte (Figura 1).

Do ponto de vista hidrogeológico, esta área está inserida no Sistema Aquífero Serra Geral possui duas ocorrências diferenciadas de armazenamento e circulação de água subterrânea: a primeira está condicionada às discontinuidades das rochas basálticas que formam o embasamento da área, caracterizando um aquífero de ocorrência fissural; e uma segunda, constituída pelo manto de alteração da própria rocha basáltica, composta principalmente por material argiloso, ambas caracterizando um aquífero freático e livre em toda sua extensão.

¹Doutorando do Instituto de Geociências e Meio Ambiente - Unesp - Universidade Estadual Paulista; (mauricio_geografia@ig.com.br).

²Departamento de Geologia Aplicada - Instituto de Geociências e Meio Ambiente - Unesp - Universidade Estadual Paulista (mrchang@rc.unesp.br), hang@rc.unesp.br)

³Departamento de Geociências - CCE - UEL - Universidade Estadual de Londrina (celligoi@uel.br).

Neste trabalho, foram feitas análises de vulnerabilidade natural à poluição do aquífero freático, dada sua distribuição relativamente uniforme em toda região. Para esta análise foi escolhido o índice DRASTIC, uma vez que possui características de simplicidade, de baixo custo, de fácil aplicação e é amplamente utilizado em estudos de vulnerabilidade.

Embora geralmente aplicado em estudos regionais, o mapeamento da vulnerabilidade natural à poluição em escala local é relevante, na medida em que o fluxo de base de rio, quando existente uma fonte poluidora provinda do aquífero, pode se transformar em um agravante ambiental para todo domínio de uma bacia hidrográfica, afetando assim todo manancial de abastecimento e o equilíbrio dinâmico do ecossistema.

LOCALIZAÇÃO DA ÁREA

A área escolhida para estudo está inserida nos limites urbanos do município de Londrina, no norte do estado do Paraná, mais precisamente na bacia hidrográfica do ribeirão Lindóia (Figura 1). A escolha desta área deve-se principalmente ao acelerado processo de ocupação urbana industrial que vem ocorrendo nesta bacia hidrográfica, uma vez que o aquífero de interesse possui histórico de acidentes provocados por vazamento de óleo combustível provindo de terminal de combustíveis à montante do ribeirão Lindóia (Figura 2). O município de Londrina está situado na região norte do estado do Paraná, sendo os limites da área urbana inseridas entre as coordenadas geográficas de 23°14' e 23°23' de latitude sul e 51°05' e 51°14' de longitude oeste.

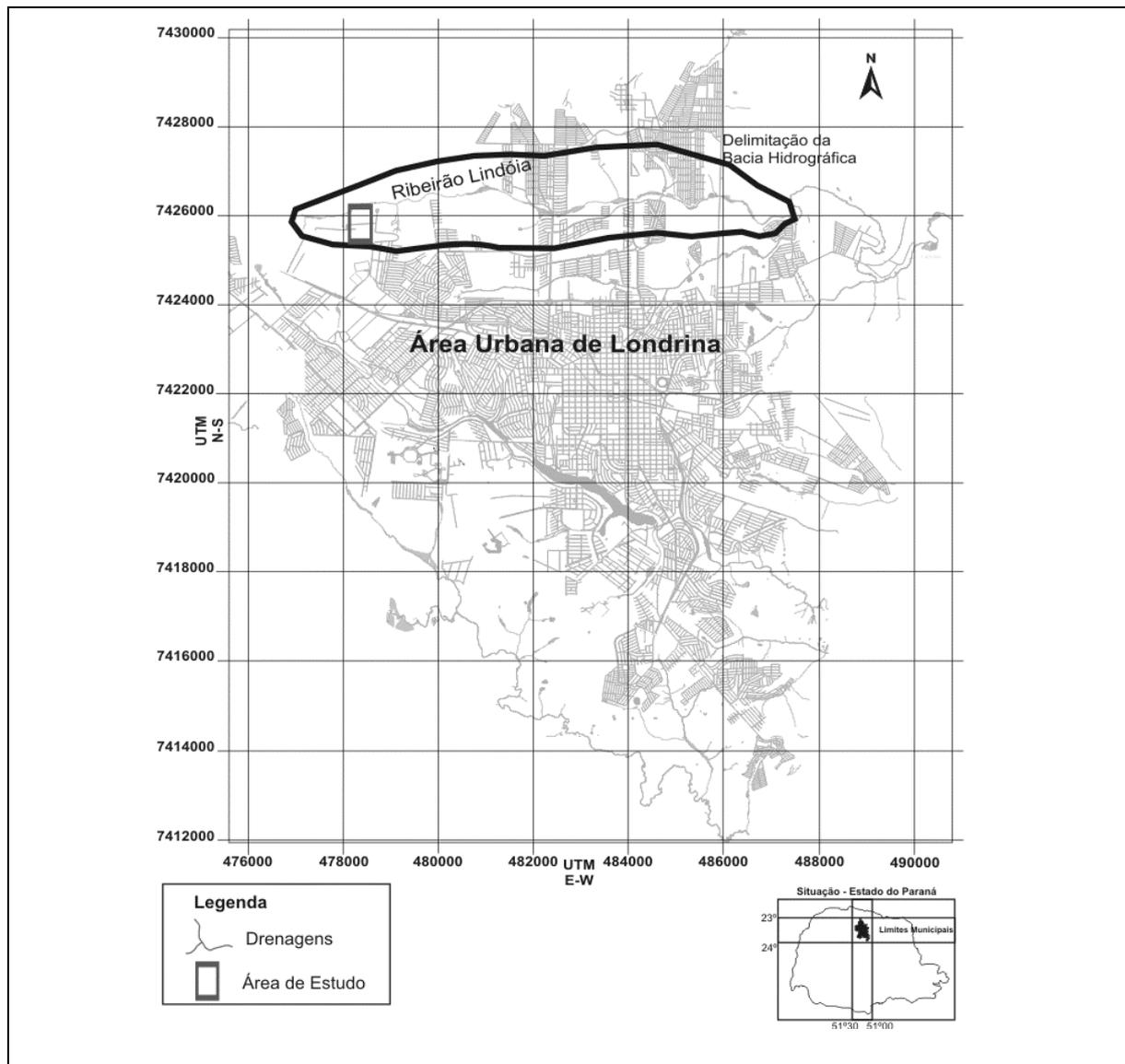


Figura 1- Mapa de localização da área de estudo
Figure 1- Study area location map

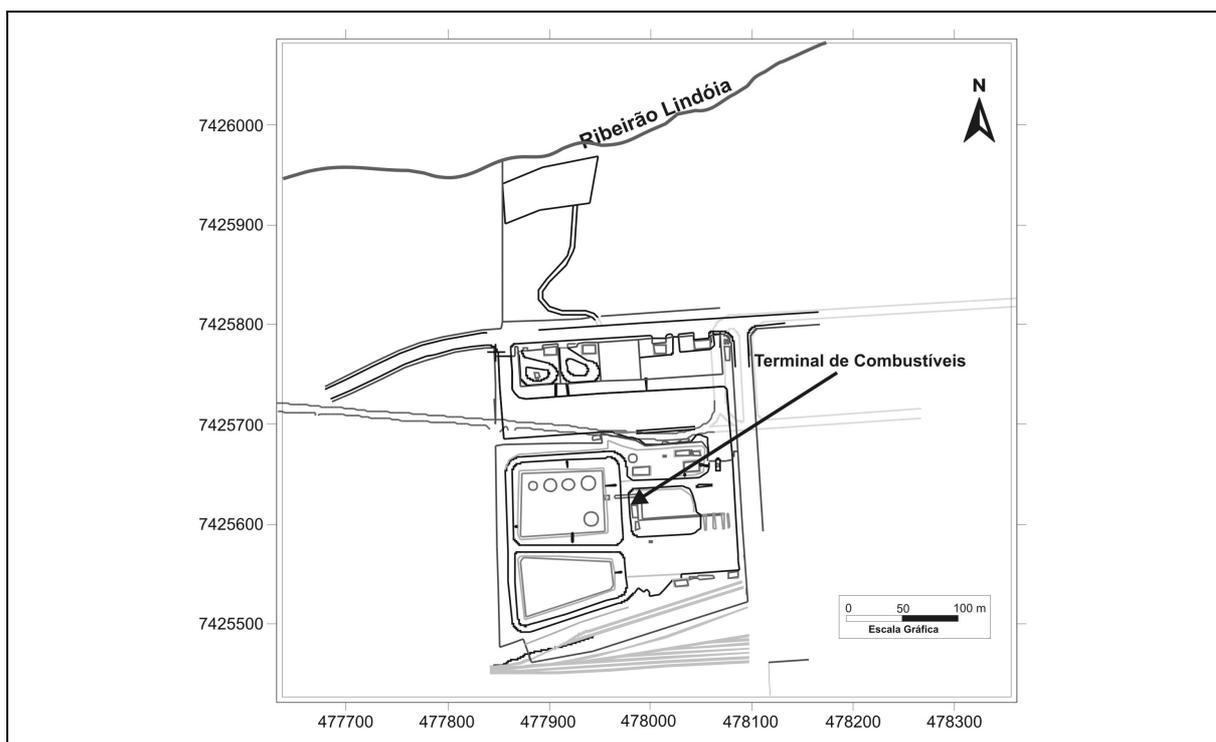


Figura 2- Detalhe da área de estudo. Em evidência, a planta do terminal de combustíveis
Figure 2- Study area detail

CARACTERIZAÇÃO REGIONAL

Aspectos Climáticos

Segundo a classificação de Köppen (*apud* NIMER, 1989), Cfa é o tipo climático predominante em todo norte, oeste e sudoeste paranaense, em altitudes normalmente inferiores a 850-900 m, abrangendo neste caso a área do município de Londrina. Segundo Mendonça (1995), o tipo climático predominante na área de estudo tem no verão sua estação mais úmida, período que concentra grande parte das chuvas que ocorrem ao longo do ano, com médias mensais de aproximadamente 200 mm e cujas temperaturas médias máximas podem atingir 28 °C. Segundo o mesmo autor, a estação de inverno representa um período de estiagem relativa na área do município de Londrina, sendo os meses de julho e agosto os mais secos do ano, com médias mensais em torno de 50 mm. Com temperaturas médias de cerca de 18 °C, esta época é marcada principalmente por incidências de geadas, especialmente no mês de julho, quando as temperaturas mínimas médias podem

chegar a 10 °C. No geral, a temperatura média da área de estudo é de 20 °C.

Hidrografia

A rede hidrográfica no município de Londrina é farta e bem distribuída. Os rios são todos perenes estando orientados, preferencialmente, segundo a direção NW-SE e, secundariamente, segundo EW (Figura 3). No geral, os rios localizados na porção centro-sul do município apresentam padrão dendrítico. Já na zona norte do município, os cursos hídricos são mais retilíneos, caracterizados fundamentalmente por uma drenagem com poucos meandros (FRANÇA, 2002).

O ribeirão Lindóia é um tributário do ribeirão Jacutinga, afluente do rio Tibagi. A nascente desse ribeirão localiza-se a oeste da cidade de Londrina, nas proximidades da cidade de Cambé. Esse curso hídrico atravessa toda porção norte da cidade, até confluir com o ribeirão Quati a leste (Figura 3).

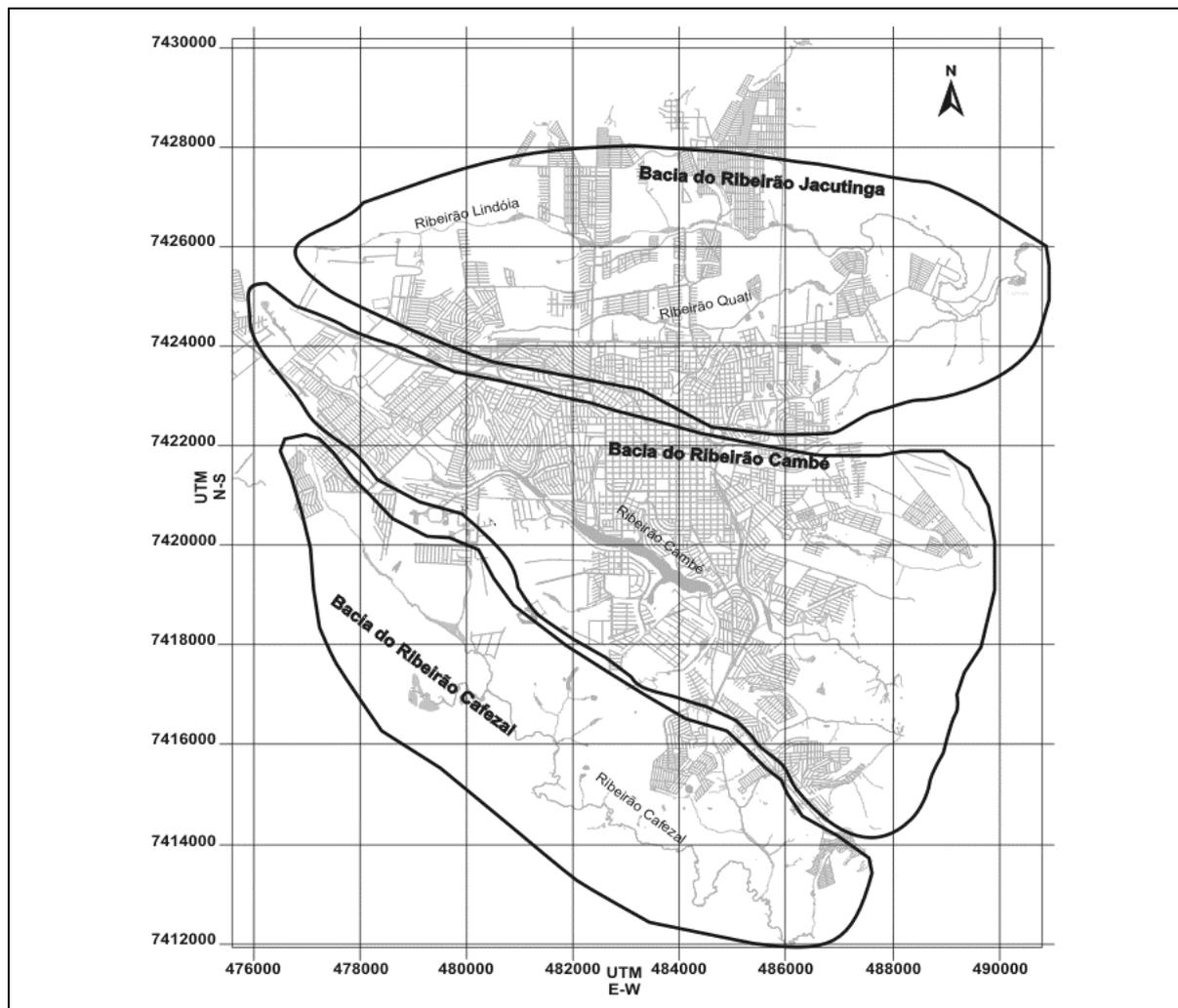


Figura 3- Principais bacias hidrográficas na área urbana de Londrina
 Figure 3- Main watersheds in Londrina (PR) urban area

Geomorfologia

O município de Londrina pode ser dividido em duas grandes áreas, conforme a inclinação das vertentes de seu relevo: na parte centro-sul, predomina relevo mais movimentado e com variada constituição litológica, o que originou vertentes bastante inclinadas; na porção centro-norte, por sua vez, predomina uniformidade litológica, com relevo suave a ondulado e vertentes menos inclinadas. Na área de estudo, a conformação topográfica apresenta inclinação suave no sentido N, obedecendo à drenagem do ribeirão Lindóia, cuja direção EW obedece, por sua vez, à drenagem do rio Tibagi, do qual é afluente direto, constituindo ambos parte da Baía do Rio Paraná (CHAVES, 2002).

Solos

A principal unidade pedológica do município de Londrina é constituída por um solo residual argiloso, resultado do alto grau de intemperismo sofrido pela rocha basáltica. A região apresenta

geralmente solos de média e/ou alta fertilidade, tais como Latossolo Vermelho e Nitossolo (EMBRAPA, 1999), ambos portadores de grandes quantidades de ferro hidratado ($Fe_2O_3 > 18\%$), o que lhes confere coloração bastante escura (VIEIRA, 1995).

O Latossolo Vermelho é um dos mais importantes solos do ponto de vista agrícola por sua fertilidade natural; sua profundidade vai além de 3 m. Segundo Stipp (2002), o Latossolo Vermelho apresenta teor de argila superior a 60% e, portanto, tem textura muito argilosa, consistência muito friável, é poroso e acentuadamente drenado.

Os Nitossolos ou a Terra Roxa Estruturada são solos bem desenvolvidos, possuem coloração que se assemelha à dos Latossolos Vermelhos, horizonte B textural com espessura de mais ou menos 2 m, textura muito argilosa (60% ou mais de argila na maior parte dos horizontes) (STIPP, 2002), sendo classificados como estruturado devido à sua estrutura subangular bem

desenvolvida. Este solo tem como características principais o B textural (argiloso) e cerosidade no horizonte B.

Contexto Geológico

A cidade de Londrina encontra-se assentada sobre a Formação Serra Geral, pertencente ao Grupo São Bento. Na área, este grupo compreende ainda a Formação Botucatu, porém de ocorrência limitada ao sul do município. Na região também afloram rochas da Formação Rio do Rasto (Grupo Passa Dois), porém de forma muito restrita na porção sul (Figura 4).

A Formação Rio do Rasto compreende os membros Morro Pelado e Serrinha. O primeiro, depositado em ambiente fluvial e de planície deltaica é constituído por siltitos e argilitos avermelhados com arenitos finos intercalados. O Membro Serrinha, desenvolvido em ambiente de frente deltaica e planície de marés, contém siltitos e arenitos esverdeados muito finos, micríticos e bancos alternados de calcarenitos (MINEROPAR, 1989).

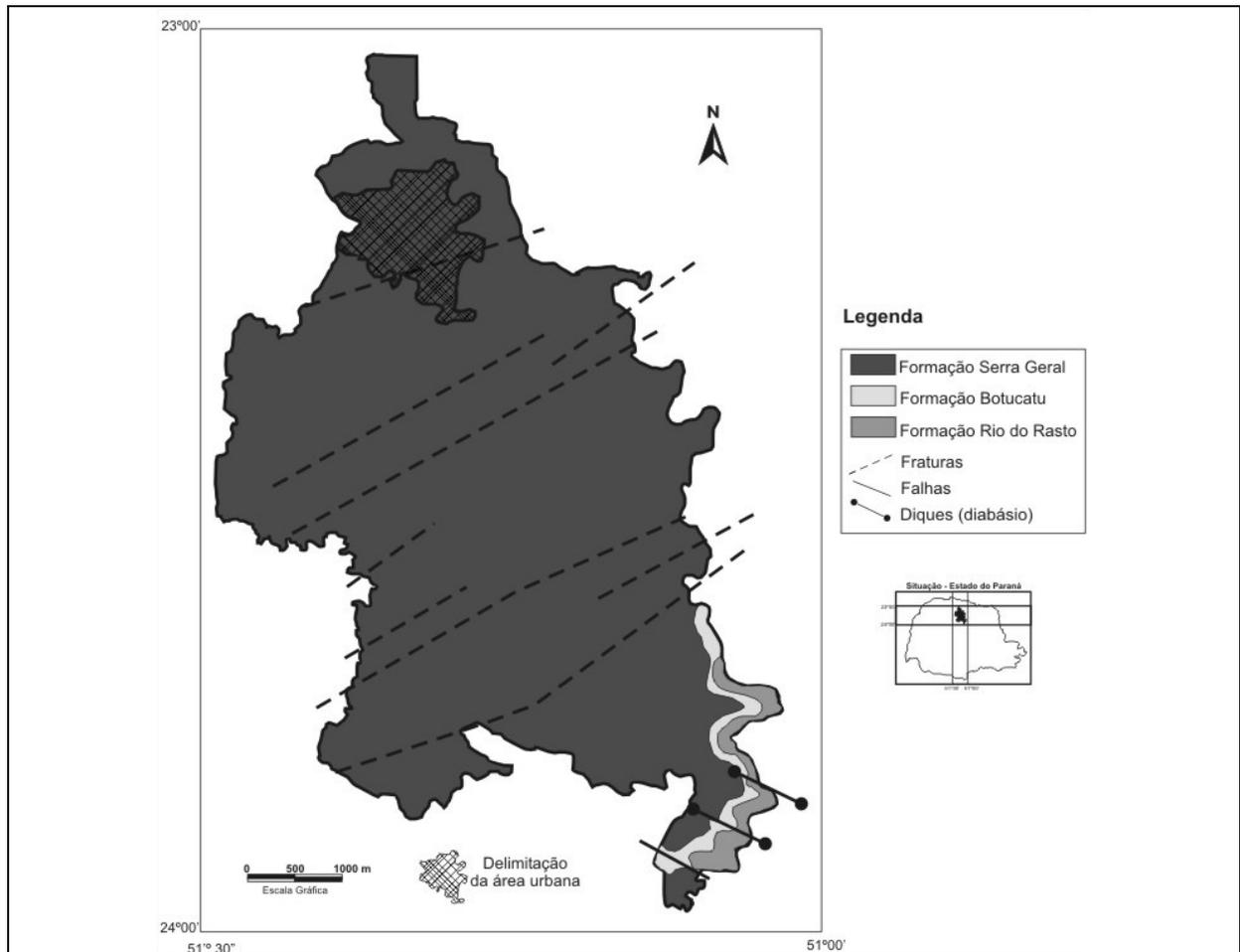


Figura 4- Mapa geológico-estrutural regional. Modificado de MINEROPAR (1989)
Figure 4- Regional geological-structural map. Modified from MINEROPAR (1989)

Sobrepondo-se discordantemente à Formação Rio do Rasto está a Formação Botucatu, de idade do Juro-Cretáceo, representada por arenitos avermelhados e acastanhados, de granulação média a grossa, com alta concentração de quartzo. Petri e Fúlfaro (1983) chamam a atenção para a presença de estratificações cruzadas de grande porte, com estratos de até 15 m de altura, resultantes da deposição em dunas eólicas.

A Formação Serra Geral é composta principalmente por rochas vulcânicas básicas,

toleíticas e andesitos basálticos, ocorrendo subordinadas quantidades de riodacitos e riolitos, de textura afanítica, coloração cinza e negra. Os topos dos derrames são geralmente amigdaloidais, apresentando grande desenvolvimento de juntas verticais e horizontais (MILANI, 1997). Apresenta manto de intemperismo pouco espesso, em algumas localidades, e de até 30 m nas regiões mais elevadas topograficamente. Quanto à idade, Milani (1997) levantou um conjunto de

informações que posicionam o evento Serra Geral entre 137 e 127 Ma, com as manifestações magmáticas mais antigas situadas no domínio noroeste da bacia e as mais jovens a sudeste, mostrando que houve migração da fonte magmática de noroeste para sudeste.

Os basaltos estudados exibem coloração cinza esverdeada, rosada a ocre amarelada quando alteradas, textura afanítica e geralmente intenso “acebolamento”, comumente próximo ao contato entre rocha e solo, formando os saprolitos. Segundo Pastore e Fontes (1998), o horizonte saprolítico ou saprolito é composto basicamente por blocos ou camadas rochosas de vários estágios de alteração, com dimensões variáveis, envolvidos por solo saprolítico. O solo tende a se desenvolver ao longo de descontinuidades remanescentes do maciço rochoso, onde a percolação da água é mais facilitada, e em zonas de rochas mais sensíveis à alteração.

Hidrogeologia

O Sistema Aquífero Serra Geral é o principal manancial de água subterrânea no município de Londrina. Além disso, atua como camada confinante superior do aquífero Guarani, um dos principais reservatórios de água subterrânea na América Latina.

As condições de armazenamento e circulação das águas subterrâneas no Sistema Aquífero Serra Geral podem ocorrer de duas formas distintas principais: através do manto de alteração da rocha basáltica, e através das descontinuidades das rochas basálticas que formam o embasamento da área.

O primeiro caso, representado pelas camadas de solo e rocha alterada (saprolito), é produto direto do intemperismo das rochas vulcânicas basálticas. Por isso, constitui-se em um meio poroso relativamente homogêneo, geralmente pouco espesso próximo às drenagens, com baixa profundidade do nível saturado e com recarga direta a partir de águas pluviais o tornando mais vulnerável à disseminação da contaminação ou poluição das águas subterrâneas. O segundo caso, por suas características litológicas de rochas cristalinas, constitui um meio aquífero de condições hidrogeológicas heterogêneas e anisotrópicas, associados à presença de estruturas tectônicas do tipo fratura e/ou falhamentos, bem como de juntas de resfriamento (CELLIGOI et al., 2001).

O Sistema Aquífero Serra geral apresenta características essenciais de aquífero livre, ou não-confinado, embora haja relatos de ocorrências locais de artesianismo em poços

tubulares perfurados em maiores profundidades na Formação Serra Geral.

MÉTODO DO ÍNDICE DRASTIC

Para avaliação da vulnerabilidade na área de estudo foi escolhido o método do índice DRASTIC, que se fundamenta num conjunto de procedimentos que permitem integrar vários parâmetros caracterizadores do meio subterrâneo e de suas especificidades. Este método foi desenvolvido pela *National GroundWater Association* (US), e empregada pela Agência de Proteção Ambiental norte-americana (USEPA), constituindo um modelo qualitativo para avaliar a vulnerabilidade natural das águas subterrâneas frente a cargas poluentes, através de variáveis hidrogeológicas (ALLER et al., 1987).

Oliveira e Lobo Ferreira (2004) consideram a aplicação do índice DRASTIC em áreas com dimensões mínimas de até 0,4 Km², o que possibilita sua utilização na área de interesse deste trabalho. Independente da escala para aplicação do índice DRASTIC, sua utilização no presente estudo reveste-se também de caráter experimental, haja vista a quantidade e a confiabilidade dos dados existentes.

O índice DRASTIC corresponde à média ponderada de sete valores, correspondentes aos seguintes parâmetros ou indicadores hidrogeológicos:

- D**- Profundidade do lençol freático ou nível da água (*Depth to groundwater*);
- R**- Recarga do aquífero (*Recharge*);
- A**- Característica do aquífero (*Aquifer media*);
- S**- Solos (*Soil media*);
- T**- Topografia (*Topography*);
- I**- Impacto na zona não saturada (*Impact of the unsaturate zone*);
- C**- Condutividade hidráulica (*hydraulic Conductivity*).

Cada parâmetro tem um peso pré-determinado que reflete sua importância relativa na quantificação da vulnerabilidade (Tabela 1). Estes pesos, denominados fatores de ponderação DRASTIC, são relacionados entre si através de uma equação simples, aplicada a cada unidade geográfica de trabalho, multiplicando-se o peso do parâmetro (p) pelo índice (c) a ser atribuído:

$$\text{Índice DRASTIC} = D_p D_c + R_p R_c + A_p A_c + S_p S_c + T_p T_c + I_p I_c + C_p C_c \quad (1)$$

Tabela 1- Parâmetros que compõem o índice DRASTIC e seus pesos relativos ou fatores de ponderação utilizados para a quantificação da vulnerabilidade natural de aquíferos

Table 1- Drastic parameters and respective weights

Parâmetros	Pesos Relativos (p)
Profundidade do lençol freático (D)	5
Recarga do aquífero (R)	4
Material do aquífero (A)	3
Solos (S)	2
Topografia (T)	1
Impacto da zona não saturada (I)	5
Condutividade hidráulica (C)	3

Fonte: Aller et al. (1987)

Embora os valores possíveis do índice DRASTIC situem-se entre 23 e 226, os mais freqüentes estão entre 50 e 200. Com base em vários autores (ALLER et al., 1987; LOBO-FERREIRA e OLIVEIRA, 1993; PARALTA e FRANCÊS, 2000), adotou-se neste trabalho as classes ou intervalos de vulnerabilidade apresentados na tabela 2.

Tabela 2- Valores correspondentes ao índice de vulnerabilidade DRASTIC e seus respectivos intervalos

Table 2- Drastic vulnerability grade ranges

Valores Correspondentes	Intervalos de Vulnerabilidade
<100	Vulnerabilidade insignificante
101 – 119	Vulnerabilidade muito baixa
120 – 139	Vulnerabilidade baixa
140 – 159	Vulnerabilidade moderada
160 – 179	Vulnerabilidade alta
180 – 199	Vulnerabilidade muito alta
> 200	Vulnerabilidade extrema

Fonte: Aller et al. (1987)

Os valores para cada parâmetro do índice DRASTIC foram definidos segundo dados preexistentes, obtidos de um conjunto de poços de monitoramento instalados na área de estudo (Figura 5). Foram também realizados trabalhos de campo que envolveram ensaios de *slug* para determinação das condutividades hidráulicas na zona saturada.

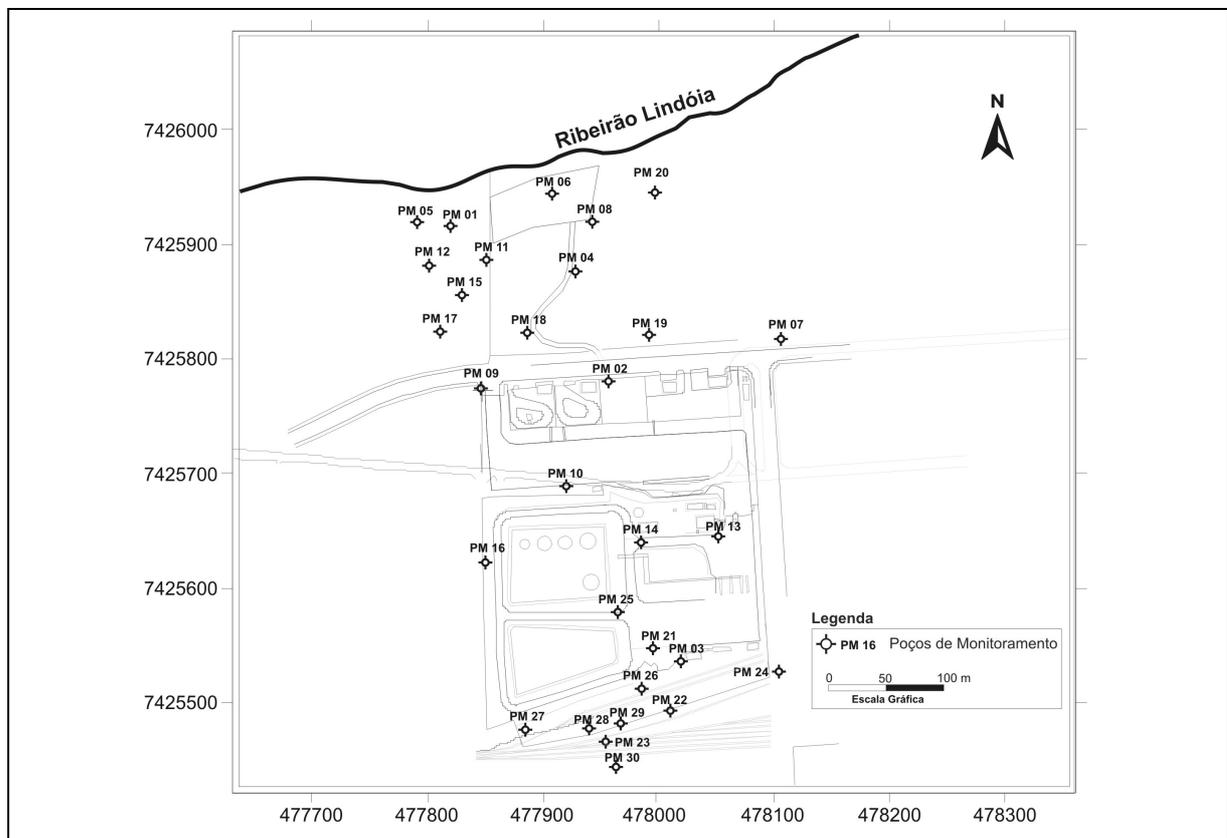


Figura 5- Mapa de localização dos poços de monitoramento na área de estudo
Figure 5-Monitoring well location map, inside the study area

RESULTADO E DISCUSSÕES

Profundidade do Lençol Freático (D)

Os valores de peso e índice de ponderação, para o parâmetro profundidade do lençol freático, estão relacionados na tabela 3.

A profundidade do lençol freático foi determinada medindo-se os níveis de água dos poços de monitoramento, durante o mês de maio de 2002, localizados na vertente direita do ribeirão Lindóia. Os valores de profundidade do lençol freático, na área de estudo, variaram de 3 m, próximo à drenagem do ribeirão Lindóia, a 25 m de profundidade, nas cotas mais elevadas topograficamente. Tal variação coaduna-se às características locais de aquífero livre, pois o lençol freático local torna-se mais raso à medida que se aproxima do ribeirão Lindóia (Figura 6).

O valor do parâmetro correspondente à profundidade do lençol freático do peso e índice de ponderação, estão relacionados na tabela 3.

Tabela 3- Classes de valores de pesos e índices de ponderação correspondentes à profundidade do nível da água

Table 3- Ranges of D parameter weights and indices corresponding to groundwater depth

Profundidade do Lençol Freático (D)		
Profundidades (m)	Peso (p)	Índice (c)
< 1,5	5	10
1,5-5	5	9
5-10	5	7
10-15	5	5
15-23	5	3
23-30	5	2
> 30	5	1

Fonte: Aller et al. (1987)

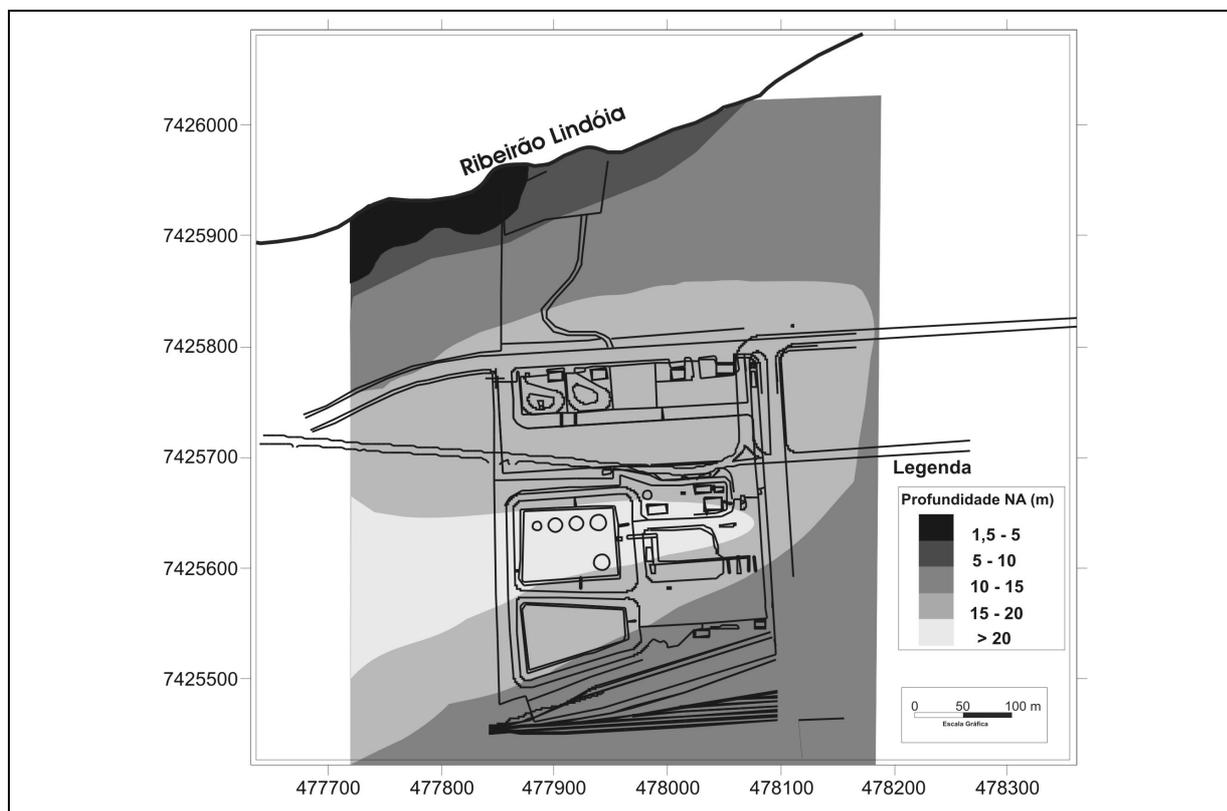


Figura 6- Profundidade do lençol freático ou nível da água segundo os intervalos de classes de profundidade
Figure 6- Groundwater depth map

Recarga do Aquífero (R)

Os dados referentes à recarga anual foram obtidos a partir do trabalho de Celligoi e Vianna (2002) para o sistema aquífero Serra Geral, na região de Londrina. Para obtenção desse índice, foram utilizados valores de recarga atribuídos à bacia do ribeirão Cafezal (Figura 3), cuja área localiza-se no perímetro urbano de Londrina, uma vez que não existem dados fluviométricos

atribuídos ao ribeirão Lindóia. Por isso, os resultados encontrados por esses autores para a recarga regional foram reproduzidos para a área de estudo, uma vez que a região como um todo apresenta certa homogeneidade física natural. Essa homogeneidade é representada principalmente pela uniformidade geológica e pela semelhança das características principais dos solos predominantes na área.

Os autores utilizaram, para o cálculo da recarga, o método da curva de recessão do ribeirão Cafezal (Figura 3). A tabela 4 apresenta valores de pesos e índice de ponderação para as classes de volume de recarga que infiltra em uma dada região, anualmente.

Tabela 4- Classes de recarga e valores correspondentes aos pesos e índices de ponderação.
Table 4- Ranges of R parameter and related weights and indices

Recarga (R)		
Recarga (mm)	Peso (p)	Índice (c)
0-50	4	1
50-100	4	3
100-180	4	6
180-255	4	8
> 255	4	9

Fonte: Aller et al., (1987)

O declínio da descarga natural de uma drenagem (recessão), na ausência de entrada por precipitação, é regida por leis de decaimento

exponencial, conforme a equação (ROSA FILHO, 1993):

$$V_0 = \frac{Q_0 \cdot 86400}{\alpha}$$

Q_0 representa a descarga do ribeirão Cafezal no início da recessão (m^3/s); Q_t equivale à descarga (m^3/s) do ribeirão Cafezal após um período t (dias); α é a constante de recessão; V_0 representa o volume total infiltrado na área da bacia contribuinte do ribeirão Cafezal e o valor 86400 corresponde ao total de segundos em um dia (24 horas).

O ano escolhido para análise da recarga foi o de 1996. Segundo Celligoi e Vianna (2002), o critério para a escolha do período de recessão do ribeirão Cafezal baseou-se nas características de sua curva de recessão, uma vez que o gráfico de vazão do ribeirão, em 1996, mostrou uma curva de recessão enfática, com os períodos inicial e final da recessão bastante evidentes (Figura 7).

O volume total infiltrado na área, V_0 , corresponde a $28,992 \times 10^6 m^3$. Sabendo que a área da bacia do ribeirão Cafezal (A), demarcada pelos autores, atinge $150 \times 10^6 m^2$, pode-se calcular a altura média da água (H) destinada à recarga do sistema aquífero.

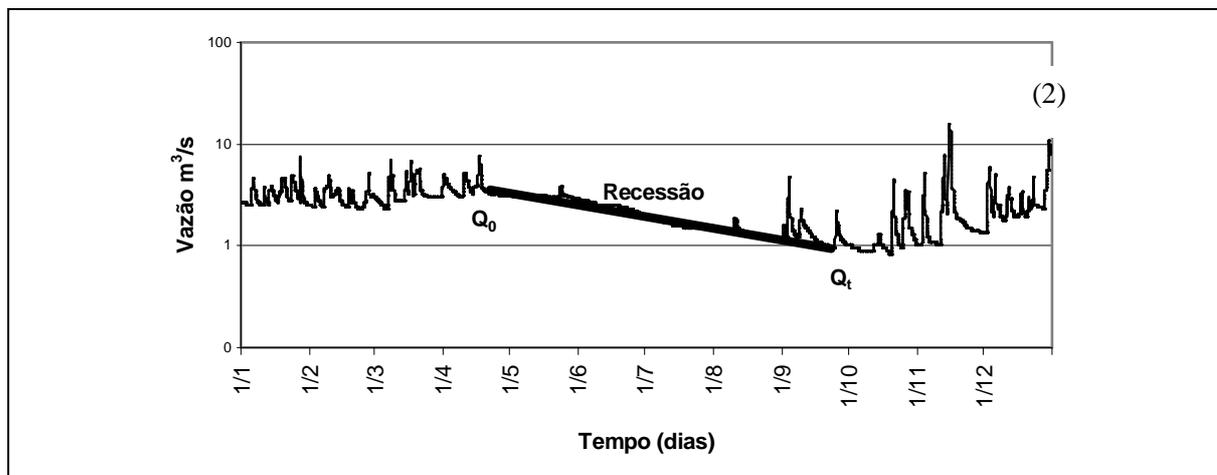


Figura 7- Gráfico da vazão do ribeirão Cafezal evidenciando o período de recessão
Figure 7- Discharge versus time graph from ribeirão do Cafezal, showing a recession period

Com base no cálculo da curva de recessão, a altura média da água infiltrada ou o que é disponível anualmente pela precipitação como recarga do aquífero freático é de aproximadamente 0,193 m, ou 193 mm. Com um total da média pluviométrica de 1.399,4 mm para o ano de 1996, pode-se verificar que aproximadamente 13,8% do total das chuvas foram destinadas à recarga do aquífero.

O valor da recarga encontrado é relativamente alto; baseando-se nos valores para as classes de recarga (Tabela 4), obtém-se índice (R) igual a 8.

Material do Aquífero (A)

Para Oliveira e Lobo Ferreira (2004), o material do aquífero (A) é parâmetro fundamental na atenuação dos efeitos dos poluentes na zona saturada. As propriedades relacionadas às fraturas do material do aquífero são imprescindíveis para esse parâmetro, pois quanto maior a densidade de diáclases, maior o grau de vulnerabilidade do aquífero. Isto porque, com o aumento da velocidade de fluxo na zona saturada, menor o tempo de ação dos processos atenuadores sobre os contaminantes.

A tabela 5 traz as principais litologias ou materiais de aquíferos considerados por Aller et al., (1987) como sendo os mais importantes para atenuação do potencial de poluição. Nesta tabela, são apresentados os pesos e intervalos de índices de ponderação para cada material considerado.

Entre parêntesis está o índice típico a atribuir caso não existam maiores informações sobre o material; estes intervalos, no entanto, devem ser utilizados com base em informações específicas sobre o material estudado.

Tabela 5- Descrição do material do aquífero e seus respectivos pesos e índices de ponderação
 Table 5- Aquifer material and weights and indices

Material do Aquífero (A)		
Descrição	Pesos Relativos (p)	Índice (c)
Folhelho argiloso, argilito	3	1-3 (2)
Rocha metamórfica/ígnea intrusiva	3	2-5 (3)
Rocha metamórfica/Ígnea alterada	3	3-5 (4)
Arenito, calcário e argilito estratificados	3	5-9 (6)
Calcário maciço	3	4-9 (6)
Areia	3	4-9 (8)
Basalto	3	2-10 (9)
Calcário em relevo cárstico	3	9-10 (10)

Fonte: Aller et al. (1987)

Com base nas informações das amostras recuperadas dos poços de monitoramento, foram construídas duas seções litofaciológicas para melhor averiguação dos materiais que compõem

o aquífero freático na área de estudo (Figuras 9 e 10). A localização em planta das seções A-B e C-D pode ser observada na figura 8.

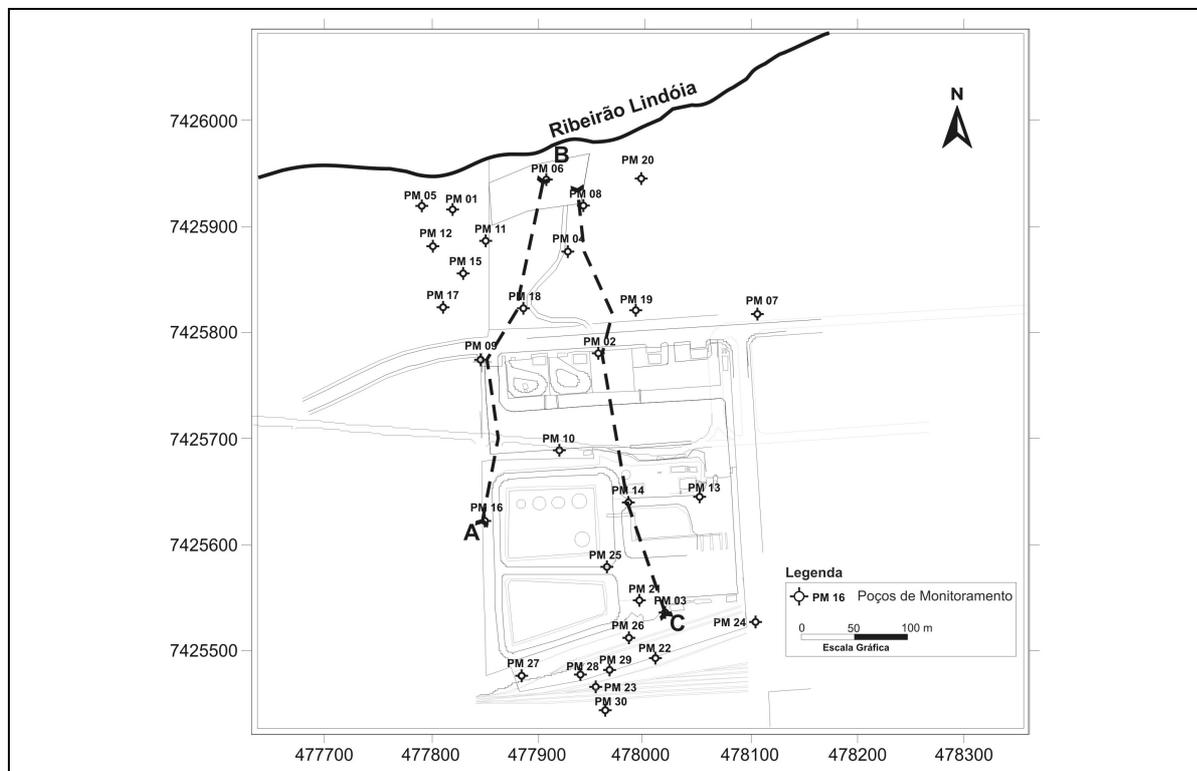


Figura 8- Mapa de localização das seções litofaciológicas
 Figure 8- Lithofacies sections location map

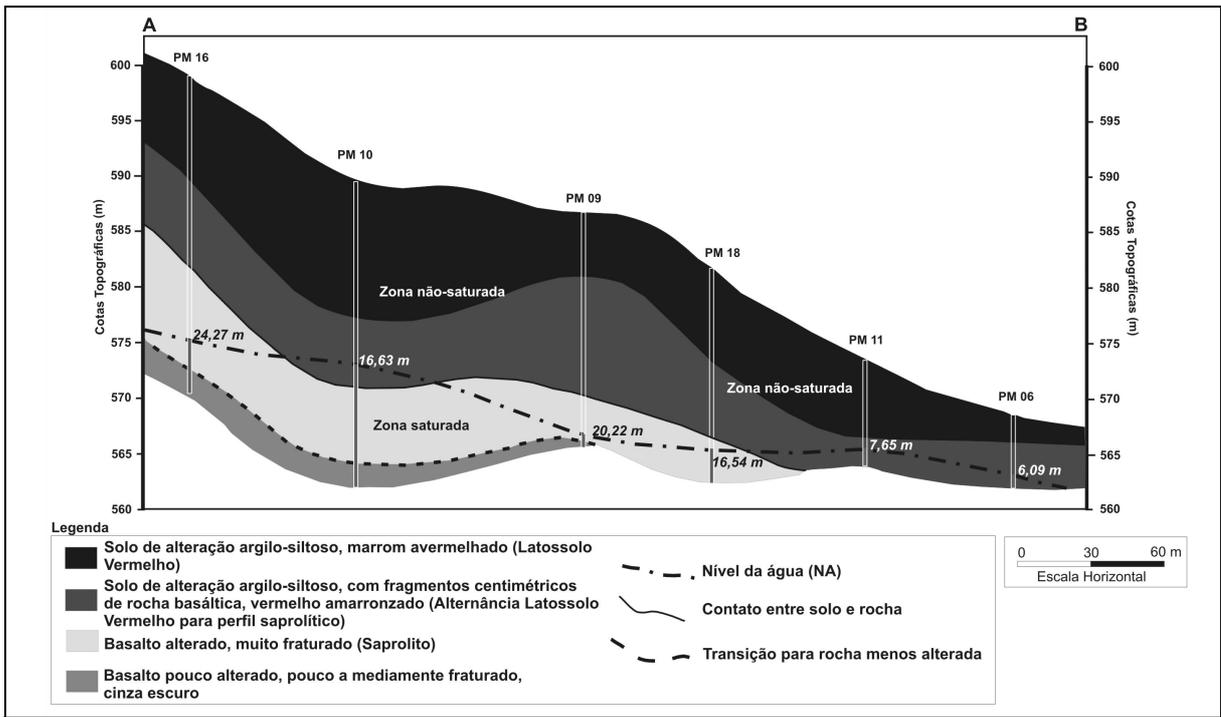


Figura 9- Seção litofaciológica A-B referente à área de estudo
 Figure 9- Lithofacie section A-B

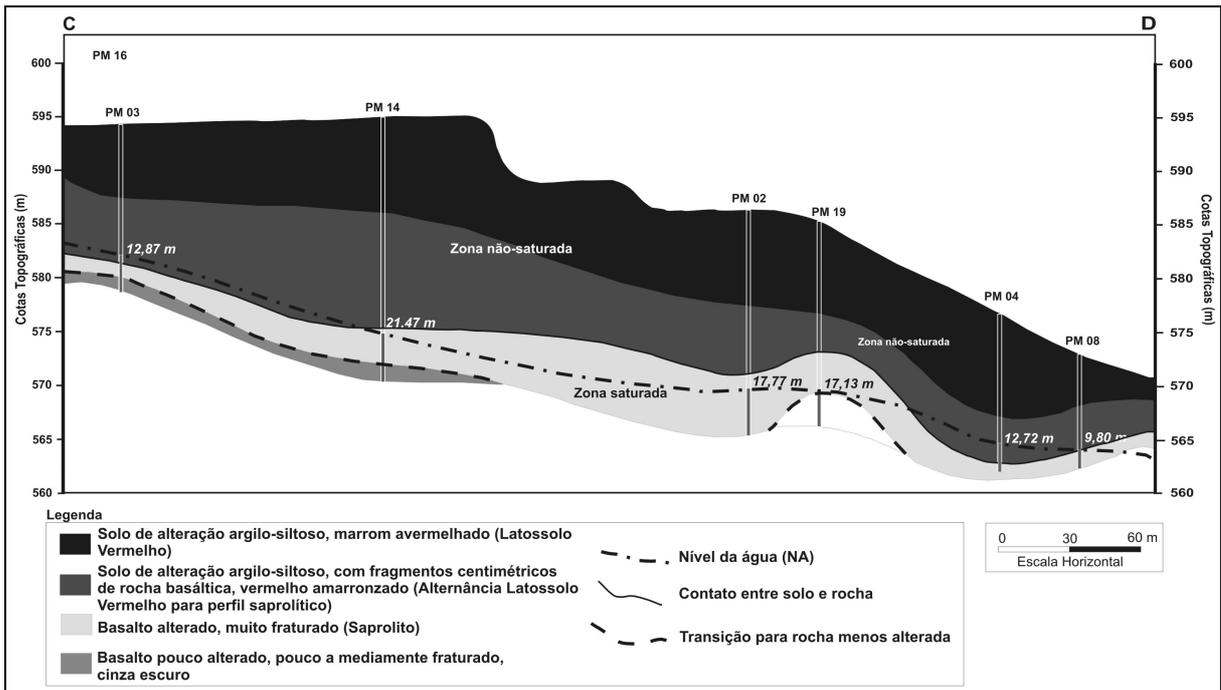


Figura 10- Seção litofaciológica C-D referente à área de estudo
 Figure 10- Lithofacie section C-D

As informações específicas do material do aquífero na área de estudo evidenciam que a zona saturada ocorre principalmente em basaltos altamente fraturados, como pode ser observado na seção C-D (Figura 10), onde as amostras recuperadas através das sondagens indicaram que todos os poços atingiram ou ultrapassaram o saprolito, até atingir a rocha sã ou mediantemente fraturada. No entanto, é necessário destacar que na zona saturada ocorrem ainda materiais

constituídos ora pela rocha sã mediantemente fraturada, ora por materiais altamente alterados provindos da mesma rocha, como visto nas sondagens 10, 11 e 6 na seção A-B (Figura 9).

Com base nessas informações e na tabela 5, o índice de ponderação atribuído ao material do aquífero livre, para estimação da vulnerabilidade, é igual a 8. Isto porque, embora constitua material com alto teor de argila (minerais de alteração do basalto), que auxiliam na alteração

de contaminantes, a ocorrência de fraturamentos concorre para sua migração, justificando a escolha do índice de ponderação relativamente elevado.

Solos (S)

Os tipos de solos predominantes na área de estudo são o Latossolo Vermelho e o Nitossolo, ambos provenientes do intemperismo das rochas basálticas, com textura muito argilosa (superior a

60%). Este tipo de textura é importantíssimo para a atenuação de possíveis contaminantes existentes nos aquíferos, já que a presença de argilominerais retarda seu deslocamento vertical, devido à diminuição do tamanho dos poros no meio.

A tabela 6 apresenta valores de peso e índices de ponderação para a estimativa do índice DRASTIC para diferentes tipos de solos.

Tabela 6- Tipos de solos e seus respectivos pesos e índices de ponderação

Table 6- Soil types and corresponding weights and indices

Tipos de Solos (S)		
Descrição	Pesos Relativos (p)	Índice (c)
Delgado ou ausente	2	10
Saibro	2	10
Muito arenoso	2	9
Turfa	2	8
Argila expansiva e/ou agregada	2	7
Arenoso	2	6
Siltoso	2	4
Muito argiloso	2	3
Calcário	2	2
Argila não agregada e não expansível	2	1

Fonte: Aller et al. (1987)

O solo encontrado na área de estudo apresenta maiores espessuras nas porções mais elevadas topograficamente, sendo constituído de textura predominantemente argilosa. Dessa forma, o coeficiente que melhor representa a realidade local, para o parâmetro de solo (Tabela 6), é o índice de ponderação igual a 3.

Topografia (T)

Os valores dos pesos e índices de ponderação correspondentes às classes de declividade para a determinação do índice DRASTIC estão relacionados na tabela 7.

Tabela 7- Classes de valores de declividade e seus respectivos pesos e índices de ponderação

Table 7- Ranges of T parameter and related weights and indices

Topografia (T)		
Declividade (%)	Pesos Relativos (p)	Índice (c)
< 2	1	10
2 - 6	1	9
6 - 12	1	5
12 - 18	1	3
> 18	1	1

Fonte: Aller et al. (1987)

Para a determinação da declividade utilizou-se de base topográfica com cotas altimétricas. A partir daí os valores foram compilados e inseridos no *software Arcview* para geração do mapa de declividade local (Figura 11).

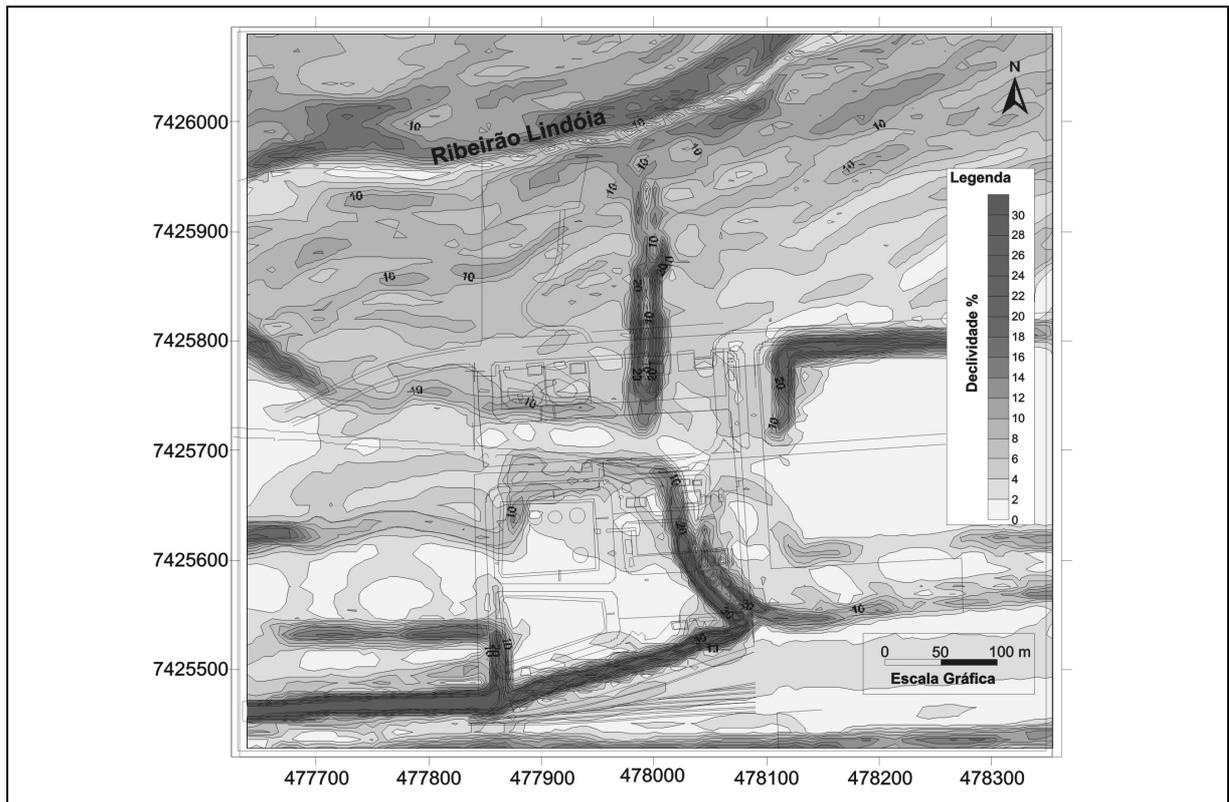


Figura 11- Mapa de declividades referente à área de estudo
Figure 11- Study area slope map

Na área de estudo, as declividades verificadas são mais amenas próximo aos topos e divisores de água, entre 0 e 10%, e mais acentuadas próximo aos fundos de vales, variando entre 10, 20 e 30% em alguns locais (Figura 11). Variações maiores são notadas próximo às margens do ribeirão Lindóia e um dos seus ravinamentos no sentido N-S, que atingem declividades de até 20%.

Em geral, as variações de declividade oscilam de 0 a 6% nos fundos de vales e até 12% nas porções inferiores das encostas; já nos topos, a declividade varia entre 0 a 12%, porém com grande predomínio de baixas declividades (0 a 2%), o que se traduz em favorecimento à infiltração da água, confirmando que as áreas mais elevadas topograficamente são as mais favoráveis à recarga pluviométrica.

Impacto da Zona Não-Saturada (I)

Para melhor avaliação do comportamento do material que compõe a zona não-saturada, foram realizadas análises dos perfis descritivos dos poços de monitoramento relacionados nas figuras 9 e 10, com a finalidade de auxiliar na atribuição do índice relativo a esse parâmetro.

Aller et al. (1987) consideram os materiais da zona não-saturada, listados na tabela 8, como importantes para a atenuação do potencial de poluição ou contaminação do aquífero. Nesta tabela, são apresentados os intervalos de índices de ponderação para diversos materiais que compõem aquíferos. Entre parêntesis está o índice típico a atribuir, caso não existam maiores informações sobre o material; no entanto, estes intervalos devem ser utilizados com base em informações específicas sobre o material estudado.

Tabela 8- Valores correspondentes aos pesos e índices de ponderação para os materiais que compõem a zona não-saturada

Table 8- Ranges of values according to the vadose zone geological framework and related weights and indices

Impacto da Zona Não-Saturada		
Descrição	Pesos Relativos (p)	Índice (c)
Camada confinante	5	1
Argila/Silte	5	2-6 (3)
Folhelho argiloso, argilito	5	3-5 (3)
Calcário	5	2-7 (6)
Arenito	5	4-8 (6)
Arenito, calcário e argilito estratificado	5	4-8 (6)
Rocha metamórfica e ígnea intrusiva	5	2-8 (4)
Basalto	5	2-10 (9)
Calcário cárstico	5	9-10 (10)

Fonte: Aller et al. (1987)

A análise dos perfis das amostras recuperadas nos poços de monitoramento permitiu a identificação, na zona não-saturada, da presença de solo de alteração com textura predominante argilo-siltosa. Entretanto, ao analisar novamente as seções litofaciológicas apresentadas nas figuras 9 e 10, é possível constatar, a certa profundidade (em média a 8 m nos locais de maior elevação topográfica e 2 m nos de menor), a presença de horizontes com grãos maiores, se comparados aos dos horizontes próximos à superfície do terreno. Estes grãos ocorrem devido à presença de fragmentos centimétricos de rocha basáltica alterada; tal característica possibilita uma maior permeabilidade nestas camadas.

Além disso, em maiores profundidades, como identificado nas seções A-B (poços 9, 16 e 18) e C-D (poços 2 e 19), é possível verificar-se a ocorrência de material saprolítico na zona não-saturada, o que o torna pouco útil à atenuação de quaisquer fontes de poluição, caso a pluma poluente atinja essa profundidade.

Assim, com base nos perfis descritivos, destaca-se que a zona não-saturada ocorre fundamentalmente sobre materiais de constituição argilosa, com baixo grau de permeabilidade. No entanto, com menor frequência e em maiores profundidades, constatou-se a presença de materiais com menor grau de alteração. Dessa forma, baseado na tabela 8, o índice atribuído é igual a 6, ou correspondente ao máximo do item argila/silte.

Condutividade Hidráulica (C)

O transporte de um poluente na zona saturada depende da permeabilidade hidráulica do fluxo subterrâneo, pois quanto maior for a condutividade hidráulica do aquífero maior será a taxa de transporte de um dado poluente e/ou contaminante.

A tabela 9 apresenta as classes de condutividade e respectivos índices de ponderação para a estimativa do índice de vulnerabilidade DRASTIC.

Tabela 9- Classes e valores de condutividade hidráulica e seus respectivos pesos e índices de ponderação
 Table 9- Ranges of C parameter and related weights and indices

Condutividade Hidráulica (C)		
Condutividade (m/dia)	Pesos Relativos (p)	Índice (c)
< 4,1	3	1
4,1 – 12,2	3	2
12,2 – 28,5	3	4
28,5 – 40,7	3	6
40,7 – 81,5	3	8
>81,5	3	10

Fonte: Aller et al. (1987)

Com vistas a quantificar o grau de facilidade do fluxo subterrâneo na área de estudo, foram realizados testes de *slug* (meio saturado), em

saprolitos, nos poços de monitoramento PM 06, PM 08 e PM 18. Os valores de condutividade (*K*) encontrados são apresentados na tabela 10.

Tabela 10- Valores de condutividade hidráulica obtidos através de ensaios de *slug* nos poços de monitoramento que atingem o saprolito

Table 10-Hydraulic conductivity data obtained from slug tests performed in monitoring wells PM-06, PM-08 and PM-18

Poço (PM)	Profundidade	<i>K</i> (em cm/s)	<i>K</i> (em m/d)
PM-06	6,77	$1,07 \times 10^{-1}$	92,4
PM-08	10,28	$2,47 \times 10^{-1}$	213,4
PM-18	19,50	$2,97 \times 10^{-2}$	25,6
Média =====>	14,03	$1,28 \times 10^{-1}$	110,4

A média aritmética estabelecida para os valores de *K* obtidos por meio do teste de *slug* foi de 110,4 m/dia, o que corresponde ao máximo do índice de ponderação (valor igual a 10, vide Tabela 9). Porém, para os estudos de vulnerabilidade é necessária a utilização do pior cenário, o que foi obtido para o poço PM 08, em que o coeficiente *K* atingiu 213,4 m/dia. Na escala de vulnerabilidade, tal resultado não altera o índice de ponderação, mas cabe destacá-lo, uma vez que corresponde a quase o dobro do valor médio calculado para *K* e a mais de 8 vezes o valor encontrado para o poço PM 18, evidenciando grande variabilidade na condutividade hidráulica. Esses valores, em geral elevados, indicam a ocorrência de significativo fraturamento nos basaltos saprolíticos da área.

Mapa de Vulnerabilidade Local

Os sete parâmetros pertencentes ao índice DRASTIC foram calculados multiplicando-se o valor do índice (c), atribuído ao parâmetro, pelo seu peso relativo (p) (equação 1); cada parâmetro possui um peso pré-determinado, que reflete sua

importância relativa na quantificação da vulnerabilidade. Assim, os índices de vulnerabilidade foram obtidos efetuando-se a somatória ponderada dos produtos calculados e dividindo-os em classes de vulnerabilidade, com vistas a obter o mapa de vulnerabilidade natural do aquífero freático local (Figura 12). Este procedimento indicou três diferentes classes de vulnerabilidade natural na área de estudo, classificadas como baixa, moderada e alta.

Após o cálculo do índice de vulnerabilidade, foram conjugados os mapas de profundidade do lençol freático com o mapa de declividade, uma vez que os índices relativos a estes parâmetros são os únicos que variam de acordo com o modo de ocorrência na área de estudo. Em seguida, o produto dessas variações foi somado aos demais índices obtidos, permitindo a construção de isolinhas conforme as classes de vulnerabilidade.

Finalmente, foram realizadas análises qualitativas de vulnerabilidade na área de estudo, em locais desprovidos de dados referentes aos poços de monitoramento, como na vertente esquerda do ribeirão Lindóia e em alguns locais

nos extremos W e E do mapa. Nesta análise, foram consideradas, as características físicas fundamentais do aquífero objeto de estudo, como a homogeneidade litológica, as características do solo, topografia e condições de armazenamento (aquífero livre).

O aquífero freático de basaltos saprolíticos, apesar da ocorrência de variações de condutividade hidráulica anteriormente mencionada (Tabela 10), é formado por litologia homogênea, constituindo meio poroso e livre em toda sua extensão na área de estudo.

Conforme apresenta a figura 12, os graus de vulnerabilidade natural variam de baixa a alta, mas com predominância, na maior parte da área, de vulnerabilidade moderada (índice de 140 a 159). O mapa de vulnerabilidade denota a importância do fator profundidade do nível de água uma vez que a faixa de maior vulnerabilidade corresponde à de menores profundidades do lençol freático (Figura 6). A vulnerabilidade de grau baixo deve-se, sobretudo, às irregularidades do terreno (diferenças de declividade).

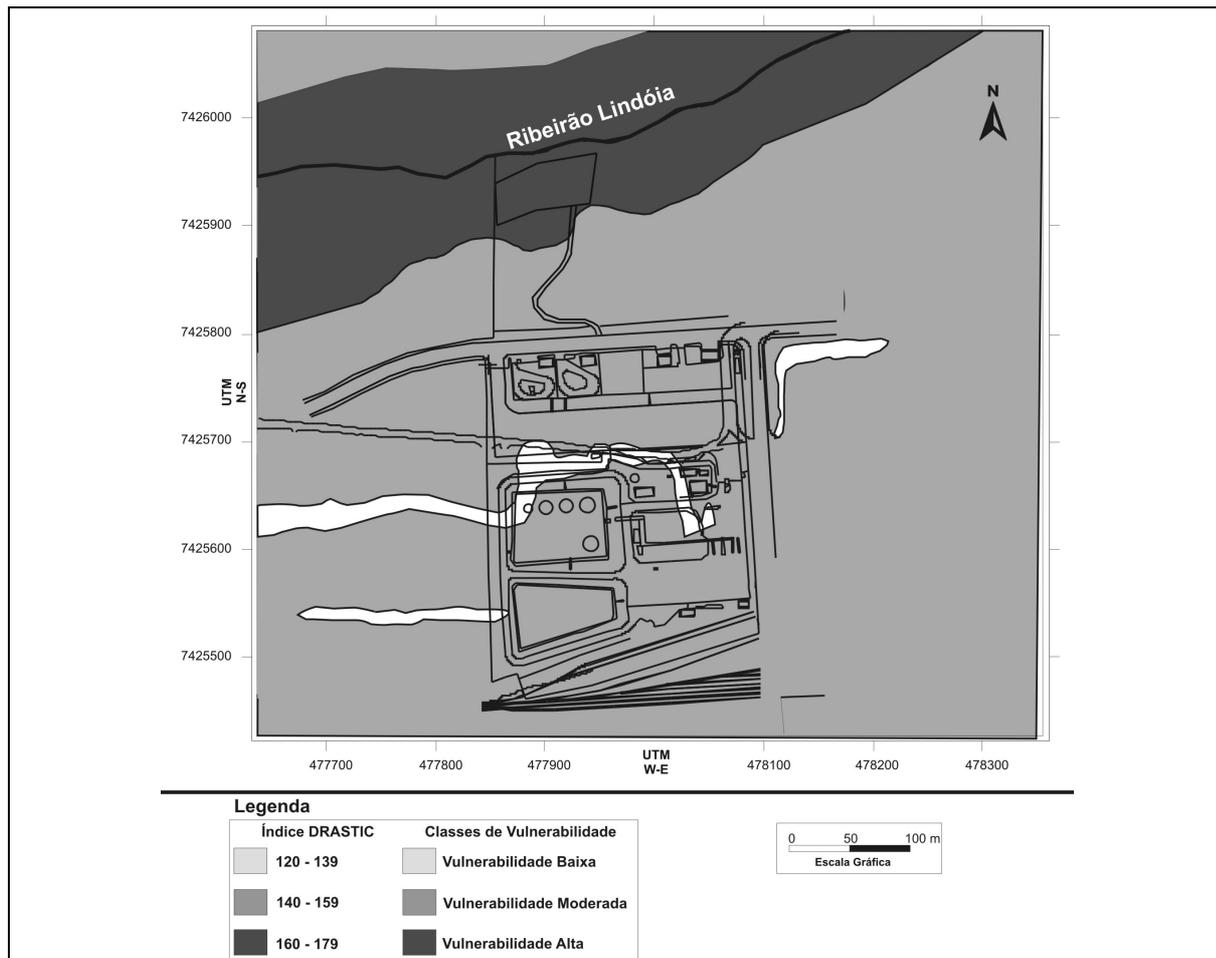


Figura 12- Mapa de vulnerabilidade natural à poluição do aquífero freático local
 Figure 12- Water table aquifer natural vulnerability map

CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

A análise das seções litofaciológicas, construídas fundamentalmente a partir da descrição dos perfis dos poços existentes na área de estudo, revelaram que o manto de alteração de origem basáltica tem constituição essencialmente argila-siltosa, o que garante certa proteção ao aquífero. Contudo, a uma profundidade maior, na zona saturada, grande parte dos poços atravessa material constituído por basaltos alterados (saprolito) muito fraturados, o que favorece o fluxo subterrâneo.

Os valores referentes aos ensaios de *slug*, na zona saturada, indicam que os perfis saprolíticos apresentam condutividades hidráulicas elevadas. Assim, mesmo em locais em que o aquífero freático local foi mapeado como vulnerabilidade natural baixa, o poluente, uma vez atingindo a zona dos saprolitos, tende a se espalhar rapidamente através das linhas de fluxo subterrâneo.

O mapa de vulnerabilidade natural do aquífero freático, gerado pela análise do índice DRASTIC para a área de estudo, mostra vulnerabilidades que variam de baixa a alta, com

predomínio de moderada. Neste mapa (Figura 12), é possível verificar-se que a vulnerabilidade aumenta com a proximidade do ribeirão Lindóia e diminui nos divisores de água. Em locais de declividade superior a 20% e com a profundidade do nível freático superior a 23 m, foi obtida vulnerabilidade baixa.

Atualmente, a área de vulnerabilidade moderada é ocupada por atividades que envolvem distribuição e estocagem de combustíveis, onde, em passado recente, ocorreram vazamentos que atingiram o lençol freático e o ribeirão Lindóia.

Embora a utilização de métodos de avaliação da vulnerabilidade natural de aquíferos deva ser aplicada em áreas previamente à sua ocupação por fontes potencialmente poluidoras, o levantamento dos parâmetros para composição do índice DRASTIC na área de estudo, aponta, com clareza, para o risco em situações específicas como a de vazamentos de poluentes, particularmente em grandes volumes.

A área de alta vulnerabilidade, próxima ao ribeirão Lindóia, não está ocupada por atividades de risco. Dadas suas características, não é aconselhável sua ocupação por quaisquer atividades antrópicas, devendo-se preservar o que resta de mata ciliar. Cabe salientar, ainda, que as atividades antrópicas que ocupam a vertente direita do ribeirão Lindóia devem ser continuamente monitoradas devido aos riscos que trazem à qualidade das águas subterrâneas.

De modo geral, o emprego do índice DRASTIC mostrou-se eficaz, considerando que na área de estudo os dados gerados, principalmente através das descrições litológicas dos poços de monitoramento e ensaios de campo,

são suficientemente confiáveis e eficientes. Mesmo com limitações, inerentes a qualquer método, a aplicabilidade do índice DRASTIC deve-se à quantidade de parâmetros diretos e indiretos utilizados em sua determinação, envolvendo maior variedade de fatores que outros índices de vulnerabilidade natural à poluição.

Finalizando, os resultados apresentados neste artigo demonstram a necessidade de estudos para avaliação da vulnerabilidade natural de aquíferos, a partir de uma perspectiva ambiental, mesmo em se tratando de áreas em escala local, como a escolhida para este trabalho. A avaliação da vulnerabilidade na área de estudo fornece os subsídios necessários para apoio ao monitoramento do aquífero freático local, auxiliando na tomada de decisões quanto ao uso e à ocupação do solo e, conseqüentemente, fornecendo subsídios para o planejamento sócio-econômico e contribuindo, assim, para a preservação ambiental e a manutenção da qualidade de vida da população local.

Como última análise, cabe mencionar que, para uma melhor relação custo/benefício na elaboração de mapas de vulnerabilidade, é conveniente a aplicação do índice DRASTIC em programas de gestão de proteção dos recursos hídricos em escalas de mapas entre 1:250.000 e 1:100.000. Isso não diminui o sucesso da utilização do índice DRASTIC no caso do presente estudo, pois a avaliação do conjunto das descrições litológicas e a utilização de modernas técnicas de ensaio de condutividade fornecem parâmetros aplicáveis a qualquer escala de trabalho.

REFERÊNCIA

- ALLER, L.; BENNET, T.; LEHR, J.H.; PETTY, R.J. **DRASTIC**: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. U.S. EPA, 1987. Report 600/2-85/018.
- CELLIGOI, A.; VIANNA, T. R. Análise das reservas de água subterrânea do aquífero Serra Geral em Londrina: Recarga e Consumo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS 12., 2002. Florianópolis. **Anais...**, Florianópolis: ABAS, 2002. CD ROM.
- CELLIGOI, A.; SANTOS, M. M.; VIANNA, T. R. Análise e interpretação do gradiente hidráulico do aquífero freático em uma área na região sul de Londrina-PR. **Revista do Departamento de Geociências**. UEL, v. 10, n. 1, 2001, p. 79-87.
- CHAVES, S. T. **Análise da evolução das formas do relevo da bacia hidrográfica do ribeirão Lindóia Londrina/Pr**. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Geografia) – Departamento de Geografia, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2002.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa Produção da Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412 p.
- FRANÇA, V. O rio Tibagi no contexto hidrogeográfico paranaense. IN: MEDRI, M. E. BIANCHINI, E., SHIBATTA, O. A., PIMENTA, J. A. (Eds). **A bacia do rio Tibagi**. Londrina: Editora UEL, 2002. p. 45 – 62.
- LOBO-FERREIRA, J.P.; OLIVEIRA, M.M. **Desenvolvimento de um Inventário das Águas Subterrâneas de Portugal**. Caracterização dos recursos Hídricos Subterrâneos e Mapeamento DRASTIC da Vulnerabilidade dos Aquíferos de Portugal. Relatório 179/93 – GIAS. Lisboa: LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1993.
- MENDONÇA, F.A. **O clima e o planejamento urbano de cidade de porte médio e pequeno: proposição metodológica para estudo e sua aplicação à cidade de Londrina/PR**. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.
- MILANI, E. J., **Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana Sul-Occidental** Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997, 2 v : il.
- NIMER, E. **Climatologia do Brasil** - Rio de Janeiro: IBGE, 2º ed., Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 1989.
- OLIVEIRA, M. M.; LOBO FERREIRA, J. P. C. Cartografia da vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas do conselho de Montemoro-o-Novo utilizando o método DRASTIC. IN: CABRAL, J. J. S. P.; LOBO FERREIRA, J. P. C.; MONTENEGRO S. M. G. L.; COSTA, W. D. (Orgs). **Água Subterrânea: Aquíferos costeiros e aluviões, vulnerabilidade e aproveitamento**. Recife: Universitária da UFPB, 2004, p. 223-276.
- PARALTA, E.A.; FRANCÉS A.P. Avaliação da vulnerabilidade à poluição DRASTIC e cartografia de risco do aquífero Gabro Diorítico da região de Beja. **Anais...**, CONGRESSO DE ÁGUAS, 2000 (disponível em www.aprh.pt/congressoagua2000/COMUNIC/R_58.PDF).
- PARANÁ (Estado). MINEROPAR. Minerais do Paraná S.A. **Mapa geológico do Estado do Paraná**. Curitiba: MME / DNPM, 1989.
- PASTORE, E.L.; FONTES, R.M. Caracterização e classificação de solos. IN: OLIVEIRA, S.A. M.; BRITO, N. A. (Eds). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998. P. 197-210.
- ROSA FILHO, E. F. Caracterização da depleção de um aquífero através do coeficiente de descarga, α , de Maillat. **Boletim Paranaense de Geociências**. Curitiba: UFPR, 1993, v. 41, p. 125-144.
- STIPP, N. A. F.; Principais tipos de solos da bacia do rio Tibagi. IN: MEDRI, M. E. BIANCHINI, E., SHIBATTA, O. A., PIMENTA, J. A.; (Ed) **A bacia do rio Tibagi**. Londrina: UEL, 2002, p. 39-44.
- VIEIRA S.A. **Manual da ciência do solo**. São Paulo: Agronômica Ceres LTDA. 1995. 464p.