

# ÍNDICE DRASTIC: MÉTODO DE APOIO A AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE NATURAL DE UM AQUÍFERO LOCAL NA ÁREA URBANA DE LONDRINA-PR

Maurício Moreira dos Santos<sup>1</sup>; Chang Hung Kiang<sup>2</sup> & André Celligoi<sup>3</sup>

**Resumo** – As atividades que produzem inúmeros impactos ao meio ambiente e a intensificação da exploração não-sustentável dos recursos naturais levam a inviabilização e ao esgotamento de mecanismos que garantem o equilíbrio do planeta. Dessa forma, a manutenção da qualidade dos recursos hídricos subterrâneos remete a uma especial preocupação com a proteção dos aquíferos. Para esse fim, propõe-se, em nível local e de reconhecimento, a avaliação da vulnerabilidade natural do sistema aquífero localizado no domínio dos basaltos da Formação Serra Geral, tendo em vista a importância da preservação desse importante recurso hídrico para o meio ambiente e para o planejamento sócio-econômico regional. Toda via, para este trabalho foram feitas análises de vulnerabilidade natural no aquífero representado pelos sedimentos argilosos, uma vez que o mesmo possui maior susceptibilidade a uma carga poluente. O método utilizado para essa avaliação é o índice DRASTIC, o qual possui características de simplicidade e utilidade necessárias para poder vir a ser considerado uma referência. A área de estudo envolve a os limites urbanos do município de Londrina – PR. Os resultados encontrados forneceram subsídios necessários como apoio a tomada de decisão para o monitoramento do aquífero freático local.

**Abstract** – The activities that produce innumerable impacts to the environment and the intensification of the not sustainable exploration of the natural resources affect the balance of the Planet. On this way, the protection of the groundwater resources must be considered. For this goal, it is necessary to evaluate the natural vulnerability of the Serra Geral aquifer system, in view of the relevance of the preservation of this important resource for the environment and the regional social-economic planning. Natural vulnerability analyses in the phreatic aquifer were made at the soil

---

<sup>1</sup> Aluno de Pós-Graduação: Unesp – Universidade Estadual Paulista; Rua 24A nº 1515 – CEP: 13506-900 fone-fax 3532-5119; mauricio\_geografia@ig.com.br.

<sup>2</sup> Professor Doutor: Unesp – Universidade Estadual Paulista; Rua 24A nº 1515 - CEP: 13506-900; fone-fax 3532-5119; chang@rc.unesp.br

<sup>3</sup> Professor Doutor: UEL – Universidade Estadual de Londrina; Caixa Postal 6001 – CEP: 86051-990 Fone: 43-33714316 Fax: 43-33714216; [celligoi@uel.br](mailto:celligoi@uel.br)

layer due to its high sensitivity to a pollutant load. The method used for this evaluation is the DRASTIC index, which is easy to use and can be able to be considered as a reference. The studied area encloses the urban limits of the city of Londrina – PR. The results had supplied necessary subsidies to the monitoring of the phreatic aquifer.

**Palavras-Chave** – aquífero freático; Índice DRASTIC; vulnerabilidade natural.

## INTRODUÇÃO

A atual sociedade, no anseio de ampliar o domínio sobre os espaços terrestres e o controle absoluto sobre o capital, exerce atividades que produzem inúmeros impactos ao meio ambiente e a intensificação da exploração insustentável dos recursos naturais, provocando a inviabilização permanente dos mecanismos que garantem o equilíbrio do planeta, colocando em risco à própria sobrevivência do ser humano na superfície do globo.

Além disso, o processo de ocupação desordenado do espaço, trás sérias conseqüências para o equilíbrio dos sistemas ambientais, e pesado ônus para o poder Público. Conforme Ross ([1]1994), os ambientes naturais, salvo algumas regiões do planeta, apresentam ou apresentavam-se em estado de equilíbrio dinâmico<sup>4</sup>, até o momento em que o ser humano passa a interferir cada vez mais intensamente na exploração dos recursos naturais. Dessa forma, em decorrência das atividades antrópicas, muitas vezes predatória sobre o meio físico, este acaba sofrendo uma aceleração de sua dinâmica, o que desencadeai sérios problemas, tanto de ordem ambiental quanto sócio-econômica.

Dessa Forma, os estudos das causas, dinâmicas e conseqüências das ações antrópicas sobre o meio ambiente se constituem em ferramentas de valor imprescindíveis para supor que as atividades ligadas ao sistema produtivo sejam sustentáveis, influenciando o mínimo possível no equilíbrio do meio ambiente e ao mesmo tempo garantindo o bem-estar do indivíduo. Dentre as agressões antrópicas, que atingem e modificam profundamente o meio ambiente, merece destaque à deterioração freqüente dos recursos hídricos.

Nesse sentido, a manutenção da qualidade dos recursos hídricos subterrâneos remete a uma especial preocupação com a proteção dos aquíferos. Para esse fim, propõe-se, em nível local e de reconhecimento, à avaliação da vulnerabilidade natural do aquífero livre localizado sobre o domínio dos basaltos da Formação Serra Geral, tendo em vista a importância da preservação desse importante recurso hídrico para o meio ambiente e para o planejamento sócio-econômico regional, dado à potencialidade exploratória sustentável de suas reservas reguladoras.

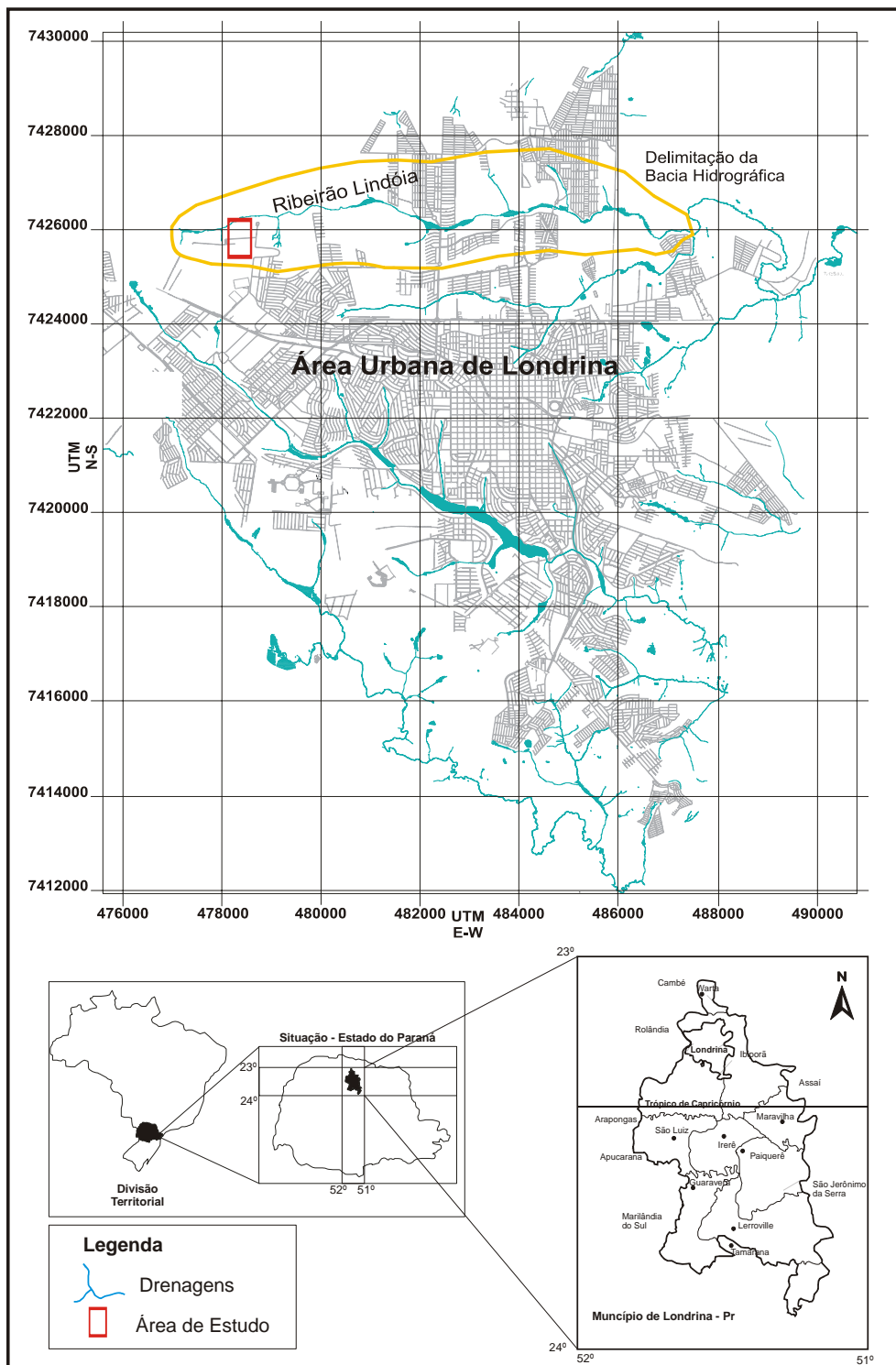
---

<sup>4</sup> A teoria do equilíbrio dinâmico do meio físico foi proposta por Hack (1960) apud Ross (1994, p.26), e tem como princípio básico o pressuposto de que o ambiente natural encontra-se em estado de equilíbrio, porém não estático, graças ao mecanismo de funcionamento dos diversos componentes do sistema.

Para a análise da vulnerabilidade natural do aquífero freático na área de estudo, foi utilizado o índice DRASTIC, no qual possui características de simplicidade e utilidade necessários para poder vir a ser considerado uma referência, soma-se a isso, inúmeros trabalhos realizados a partir desse índice, pois é um dos métodos mais difundidos no mundo atualmente que visam tal objetivo.

### **Localização da Área**

A região escolhida para o estudo está inserida nos limites da área urbana do município de Londrina-Pr, mais precisamente na bacia hidrográfica do ribeirão Lindóia. O município 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).



**Figura 1** - Mapa de localização da área de estudo. Modificado de IPPUL, 2002.

### Justificativa

O presente estudo justifica-se pela necessidade de elaboração de estratégias para a defesa do aquífero freático local através de estudos hidrogeológicos que visam à avaliação da vulnerabilidade natural a poluição, uma vez que o acelerado processo de ocupação urbana industrial ocorre de forma desordenada na bacia hidrográfica do ribeirão Lindóia, sobretudo através da construção de conjuntos

habitacionais, instalação de indústrias e a presença de terminais de combustíveis que, associado ao uso indiscriminado do solo, vem desencadeando problemas de ordem social e ambiental.

## **Objetivo**

O objetivo principal da presente pesquisa é a realização de estudos hidrogeológicos do aquífero freático nos domínios da Formação Serra Geral, que visaram principalmente, avaliar o grau de vulnerabilidade natural através da aplicação do método DRASTIC.

## **PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS**

Numa primeira fase realizou-se o levantamento dos principais trabalhos científicos e teses de hidrogeologia e geologia relacionadas à vulnerabilidade natural de aquíferos. A segunda fase desse estudo contou com os levantamentos de campo, através de reconhecimento da área de estudo, ensaios de permeabilidade hidráulica, visita a afloramentos e tomada de posição dos poços localizados através de GPS (Global Position System). A integração e a compilação cartográfica foram realizadas através do programa de editoração AutoCad.

Por fim, realizou-se a análise integrada de todas as variáveis destacadas fundamentadas de acordo com os objetivos propostos. Nas páginas subseqüentes, cada etapa de trabalho será descrita segundo os procedimentos adotados de análise baseada nas referências levantadas.

## **Índice DRASTIC**

O método utilizado para a avaliação da vulnerabilidade na área de estudo se baseou no índice DRASTIC, que se fundamenta num conjunto de procedimentos que permitem integrar vários parâmetros caracterizadores do meio subterrâneo e da sua especificidade. Esta metodologia foi desenvolvida pela National Ground Water Association, e é empregada pela Agência de Proteção Ambiental norte-americana (US-EPA), constituindo-se num modelo qualitativo para avaliar a vulnerabilidade natural das águas subterrâneas a cargas poluentes através de variáveis hidrogeológicas (Aller et al., [2]1987).

O índice DRASTIC corresponde à média ponderada de 7 valores correspondentes aos seguintes 7 parâmetros ou indicadores hidrogeológicos:

- **D** - Profundidade da zona não-saturada do solo (Depth to groundwater);
- **R** – Recarga do aquífero (Recharge);
- **A** – Característica do aquífero (Aquifer characteristic);
- **S** - Solos (Soil media);
- **T** - Topografia (Topography);

- **I** - Impacto na zona não saturada (Impact of the insaturate zone);
- **C** - Condutividade hidráulica (Conductivity hydraulic).

Estes fatores, denominados fatores de ponderação DRASTIC, são relacionados entre si através de uma equação simples, aplicada a cada unidade geográfica de trabalho:

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

Onde:

- ✓  $D_p, R_p, A_p, S_p, T_p, I_p, C_p$  = pesos dos fatores DRASTIC na equação;
- ✓  $D_c, R_c, A_c, S_c, T_c, I_c, C_c$  = fator de carga das variáveis nos seus respectivos intervalos de ocorrência.

A Tabela 1 disponibiliza as gamas de pesos relativos para aplicação geral do método DRASTIC na avaliação da vulnerabilidade natural de aquíferos e a Tabela 2 apresenta os valores totais para o índice e os intervalos de vulnerabilidade.

**Tabela 1** - Parâmetros pertencentes ao índice DRASTIC e seus pesos relativos ou fatores de ponderação utilizados para a quantificação da vulnerabilidade natural de aquíferos.

Modificado de Lobo-Ferreira e Oliveira ([3]1993).

<b>Parâmetros (p)</b>	<b>Pesos Relativos (c)</b>
Profundidade da zona não-saturada do solo (D)	5
Recarga do aquífero (R)	4
Características do aquífero (A)	3
Solos (S)	2
Topografia (T)	1
Impacto da zona não saturada (I)	5
Condutividade hidráulica (C)	4

Para a aplicação do índice DRASTIC no presente trabalho, foi admitida à existência de um contaminante universal possuidor da mesma mobilidade em meio poroso que a água, que se introduz pela superfície do terreno atravessando a zona não saturada através da infiltração e atingindo a água subterrânea, num processo de deslocamento desde as zonas de recarga até as áreas de descarga do aquífero.

**Tabela 2** - Valores correspondentes ao índice de vulnerabilidade DRASTIC e seus respectivos intervalos. Modificado de Aller et al. (1987).

<b>Valores Correspondentes</b>	<b>Intervalos de Vulnerabilidade</b>
<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

### **Poços de Monitoramento**

As informações pré-existentes retiradas dos poços de monitoramento tiveram por finalidade a investigação e a caracterização da ocorrência das águas subterrâneas local, através da determinação da espessura de solo e rocha alterada, que somados as características intrínsecas do aquífero definiram os parâmetros que contribuíram para a avaliação hidrogeológica da área de estudo e assim a geração de um mapa de vulnerabilidade do aquífero freático objeto de estudo.

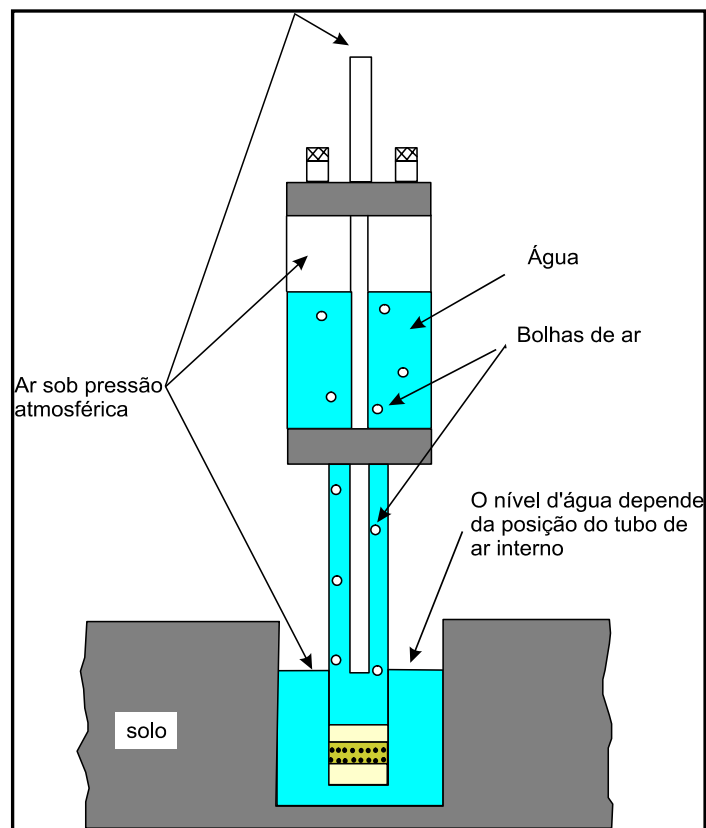
### **Condutividade Hidráulica**

Ensaio de condutividade hidráulica ou permeabilidade<sup>5</sup> foram realizados com a finalidade de se obter parâmetros hidráulicos do aquífero. Para esse fim utilizou-se o *Permeâmetro Guelph*, modelo 2800 que determinou a condutividade hidráulica *in situ* na zona não saturada formada pelos latossolos provenientes da alteração das rochas basálticas na região do município de Londrina.

Na realização dos ensaios de infiltração como o *Permeâmetro Guelph* são utilizadas cargas constantes nos horizontes não saturados do solo, segundo o princípio do Sifão de Mariotte (Figura 2). O procedimento do ensaio requer, após a análise e seleção dos locais a serem ensaiados, a realização de furos a trado com fundo plano.

---

<sup>5</sup> A condutividade hidráulica ou permeabilidade hidráulica é em função do meio poroso e das características do fluido que o atravessa, já a permeabilidade intrínseca está relacionada somente as características do meio poroso, não importando as propriedades do fluido.



**Figura 2** - Esquema de funcionamento de um *Permeômetro Guelph*.

Modificado de Oliva ([4] 2002).

Quando se estabelece um nível d'água (carga hidráulica) constante no interior do furo de trado, origina-se um "bulbo" de saturação d'água a partir de sua base. As características e dimensões deste "bulbo" de saturação d'água, uma vez atingida a condição de estabilidade, variam com as características do solo ensaiado. O conhecimento do valor da taxa de infiltração, associado às dimensões do furo e da altura da coluna d'água em seu interior, permite o cálculo da condutividade hidráulica in situ, através da seguinte expressão, segundo Soil Moisture Corp.([5]1987):

$$K = [(0,0041)(X)(R_2) - (0,0054)(X)(R_1)] \quad (2)$$

ou

$$K = [(0,0041)(Y)(R_2) - (0,0054)(Y)(R_1)] \quad (3)$$

### Levantamentos Topográficos

Os levantamentos topográficos referentes à área de estudo, contaram com a apresentação da carta das cotas altimétricas elaboradas pelo IPPUL (Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Londrina) para a área urbana de Londrina na escala de 1: 50.000 em modelo digital do ano de 2001.



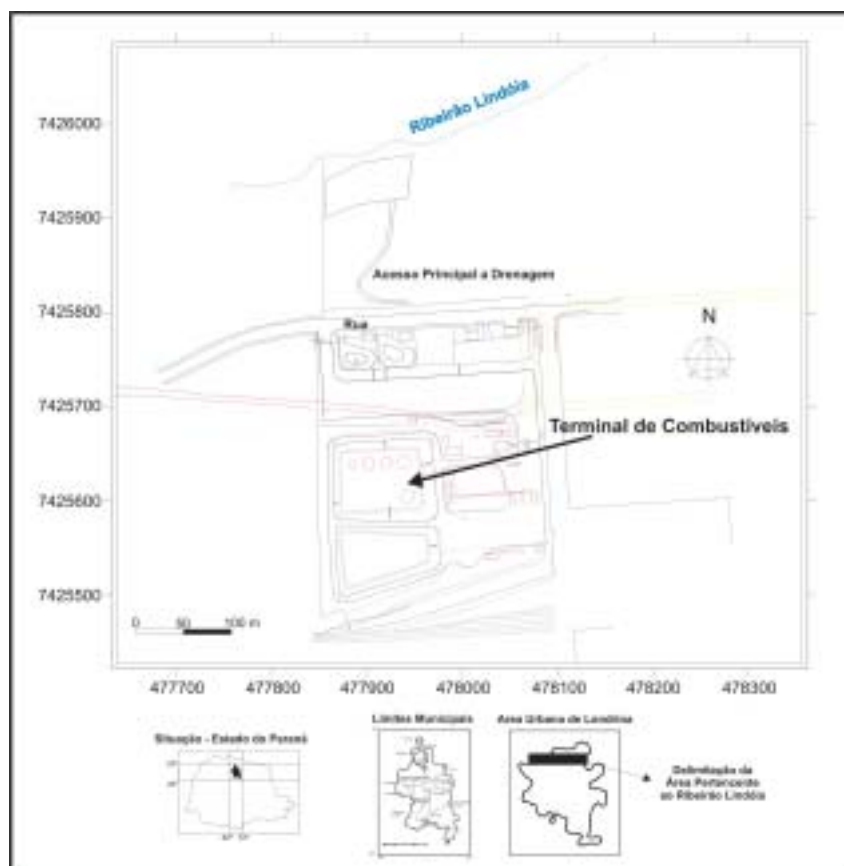
Através desse levantamento topográfico será calculada a declividade através da utilização do software IDRISI.

## CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA

Os estudos do meio físico, ou seja, um estudo que busque o esclarecimento de como se dá à dinâmica dos elementos que compõe o espaço natural, foi essencial para a compreensão dos processos que envolvem a avaliação da vulnerabilidade natural do aquífero situado na área de estudo.

Dessa forma, a análise foi realizada em nível de escala regional a local, para melhor compreensão dos fatores. Dentre os elementos do meio físico natural destacam-se o clima, a hidrografia a geomorfologia, a geologia, os solos e a hidrogeologia.

A área de estudo localiza-se na vertente esquerda do ribeirão Lindóia, próximo a nascente desse importante corpo d'água. A drenagem do ribeirão está inserida nos limites da área urbana do município de Londrina (Figura 3). Atualmente, nessa área, verifica-se o predomínio de uso e a ocupação do solo por empresas de estocagem de combustíveis e atividades agro-pastoris.



**Figura 3** - Mapa indicando a área de estudo de uma forma ampliada.

## **Aspectos Climáticos**

As condições médias da atmosfera que identificam o clima de uma dada região são definidas segundo a situação geográfica de localização em relação ao planeta. Portanto, situado no Hemisfério Sul e cortado pela linha do trópico de capricórnio, o estado do Paraná sofre influências de alguns fatores macroclimáticos, que lhe garantem o predomínio do clima subtropical.

Porém, a conformação topográfica paranaense atribui algumas diferenciações em relação aos subtipos climáticos, destacando-se o Cfa (Subtropical Úmido Mesotérmico), Cfb (Subtropical Úmido Mesotérmico) e Af (Clima tropical super úmido).

Segundo a classificação de Köppen (apud Nimer, [6] 1989) Cfa é o tipo climático predominante em todo norte, oeste e sudoeste paranaense, em altitudes normalmente inferiores a 850-900 metros abrange neste caso a área pesquisada.

As temperaturas médias do norte paranaense são relativamente altas, com índices superiores a 22°C nos meses de verão e dificilmente inferiores a 18°C nos meses mais frios, enquanto que a precipitação média anual na região varia de 1500mm a 1700mm (Nimer, [5]1989).

## **Aspectos Geomorfológicos**

Segundo Maack ([7]1981), as formas no relevo do estado do Paraná possui as atuais características devido às ações predominantes dos sistemas hidrográficos, movimentos epirogênicos e tectônicos e pela influência das alterações do clima. Para o autor, o relevo paranaense pode ser agrupado em cinco regiões orográficas distintas: Litoral, Serra do Mar, Primeiro Planalto, Segundo Planalto e Terceiro Planalto.

O norte paranaense, no qual envolve a área de estudo, possui evolução geomorfológica disposta por toda a bacia sedimentar do Paraná, inserida no Terceiro Planalto Paranaense, onde se desenvolve a estrutura geomorfológica das Cuestas Areníticas Basálticas. Para A'B Saber ([8]1956), os derrames de “trapp” abrangem a extensão total de rochas do 3º planalto do estado do Paraná, entre o rio Paranapanema e o divisor de águas Iguaçu-Uruguai. Observa-se aí, uma leve depressão sinclinal em direção à bacia do Paraná, até o rio Paranapanema. A inclinação da camada eruptiva básica para o norte está orientada em ângulo reto por uma linha tectônica, cruzando o vale do rio Paraná.

## **Aspectos Pedológicos**

Para Vieira ([9]1995), do ponto de vista morfológico são várias as características que irão definir um perfil de solo, no qual se destacar a cor, a textura, a estrutura, a consistência e a porosidade.

O Latossolo Roxo e a Terra Roxa Estruturada são as principais formações pedológicas encontradas na região de estudo. Hoje a EMBRAPA ([10]1999), sugere uma nova classificação para esses tipos de solos, os nomeando em Latossolo Vermelho e Nitossolo respectivamente. De

modo geral, os solos na região em questão apresentam-se normalmente profundos, pouco suscetíveis à erosão.

O Latossolo Vermelho é um dos mais importantes solos do ponto de vista agrícola pela fertilidade natural apresentada. Sua coloração caracteriza-se pelo vermelho fosco, ou mesmo bruno avermelhado e quando umedecida parece tornar-se arroxeadada.

Suas características morfológicas apresentam poucas variações, fazendo com que os diversos horizontes se apresentem poucos individualizados e difusos. O Latossolo Vermelho é formado quase que completamente da rocha mãe (basalto) e constituído de grandes quantidades de ferro hidratado, dando-lhe a característica de coloração bastante escura.

O Nitossolo ou a Terra Roxa Estruturada possui coloração que se assemelha ao Latossolo Vermelho, sendo que sua importância para a agricultura é a mesma.

### **Aspectos Geológicos**

A área de estudo está inserida geologicamente nos limites da Bacia Sedimentar do Paraná, uma extensa depressão deposicional situada no centro-leste da América do Sul, abrangendo uma área de 1.600.000 Km<sup>2</sup>, sendo que sua maior extensão encontra-se no território Brasileiro (Petri & Fúlfaro [11]1983).

A Bacia do Paraná apresenta a forma aproximada de uma elipse aberta para sudoeste. No estado do Paraná, as rochas pertencentes à Bacia apresentam inclinação homoclinal de cerca de 3<sup>o</sup> em direção ao oeste (calha do Rio Paraná), sua porção mais deprimida. Sua forma superficial côncava deve-se ao soerguimento flexural no final do mesozóico, denominado Arqueamento de Ponta Grossa.

Petri & Fúlfaro (ibidem) ressaltam a importância dos grandes alinhamentos estruturais, a maioria com direção NW/EW, os quais influenciaram ao longo da história evolutiva da bacia, as áreas de maior subsidência e conseqüentemente, com maior sedimentação. Estes alinhamentos influenciaram ainda o magmatismo que afetou a bacia.

Nesse sentido, nos períodos Jurássico e Cretáceo, iniciou-se uma verdadeira atividade vulcânica, caracterizando esse tempo geológico como a Reativação Wealdeneana. Tratava-se de erupções magmáticas do tipo de fissuras que cobriram grande parte da Bacia do Paraná.

Segundo Schneider et al, ([12]1974) as espessuras totais alcançam mais de 1500 metros, em outros locais como na região limítrofe entre o Rio Grande do Sul e Uruguai – Argentina os derrames não ultrapassam espessuras de 50 metros, o que indica que esta região estava mais distante dos locais de efusão.

As atividades tectono-magmáticas que ocorreram durante o Mesozóico afetaram os demais compartimentos geológicos da Bacia do Paraná provocando inclusive uma certa reativação do Arco de Ponta Grossa através da intrusão de inúmeros diques de diabásio.

## **Geologia Regional**

A região definida para estudo, assenta-se sobre a Formação Serra Geral no qual pertence ao Grupo São Bento. Compreende ainda esse Grupo as formações Botucatu e Pirambóia, porém sem a ocorrência de afloramentos na região de estudo.

O magmatismo da Serra Geral recobre mais de 1.200.000 km<sup>2</sup> abrangendo os estados do centro sul do Brasil bem como parte do Uruguai, Argentina e Paraguai.

A Formação Serra Geral é composta principalmente por rochas vulcânicas básicas, toleíticas, de textura afanítica, coloração cinza e negra, amigdaloidal nos topos dos derrames, grande desenvolvimento de juntas verticais e horizontais com intrusões alcalinas, pequenas lentes de arenito e com o manto de intemperismo muito pouco presente em algumas localidades, até cerca de 30 metros nas regiões mais elevadas topograficamente. (Schneider et al, *ibidem*). Portanto, os principais tipos litológicos são o basalto, riolito e riolito.

## **Aspectos Hidrogeológicos**

Na grande área estudada existem duas formas de ocorrência de água subterrânea: o aquífero freático e o sistema aquífero Serra Geral (Celligoi et al, [13] 2001).

O aquífero freático, representado aqui pelas camadas de solo e rocha alterada, pelas suas características geológicas de sedimentos argilosos, constitui-se em um meio poroso heterogêneo, geralmente pouco espesso e com baixa profundidade do nível saturado.

Este aquífero tem características essenciais de aquífero livre, ou não-confinado. Dessa forma, a recarga se dá diretamente a partir de águas pluviais nas áreas mais elevadas topograficamente, aumentando os riscos em relação à contaminação ou poluição das águas subterrâneas.

Nesse sentido, a infiltração e percolação de contaminantes através de uma camada de solo ou rocha alterada provocam a migração de uma série de compostos químicos orgânicos e inorgânicos através da zona não saturada, podendo alguns desses compostos atingirem a zona saturada e, portanto poluir ou contaminar o aquífero.

Ao contrário dos sistemas aquíferos sedimentares, os quais possuem uma certa homogeneidade física, o sistema Serra Geral, pelas suas características litológicas de rochas cristalinas, se constitui em um meio aquífero de condições hidrogeológicas heterogêneas e anisotrópicas (Freeze & Cherry, [14]1979).

Dessa forma, o modo de ocorrência da água subterrânea fica restrito às zonas de descontinuidades das rochas, as quais se constituem principalmente em estruturas tectônicas do tipo fratura e/ou falhamentos.

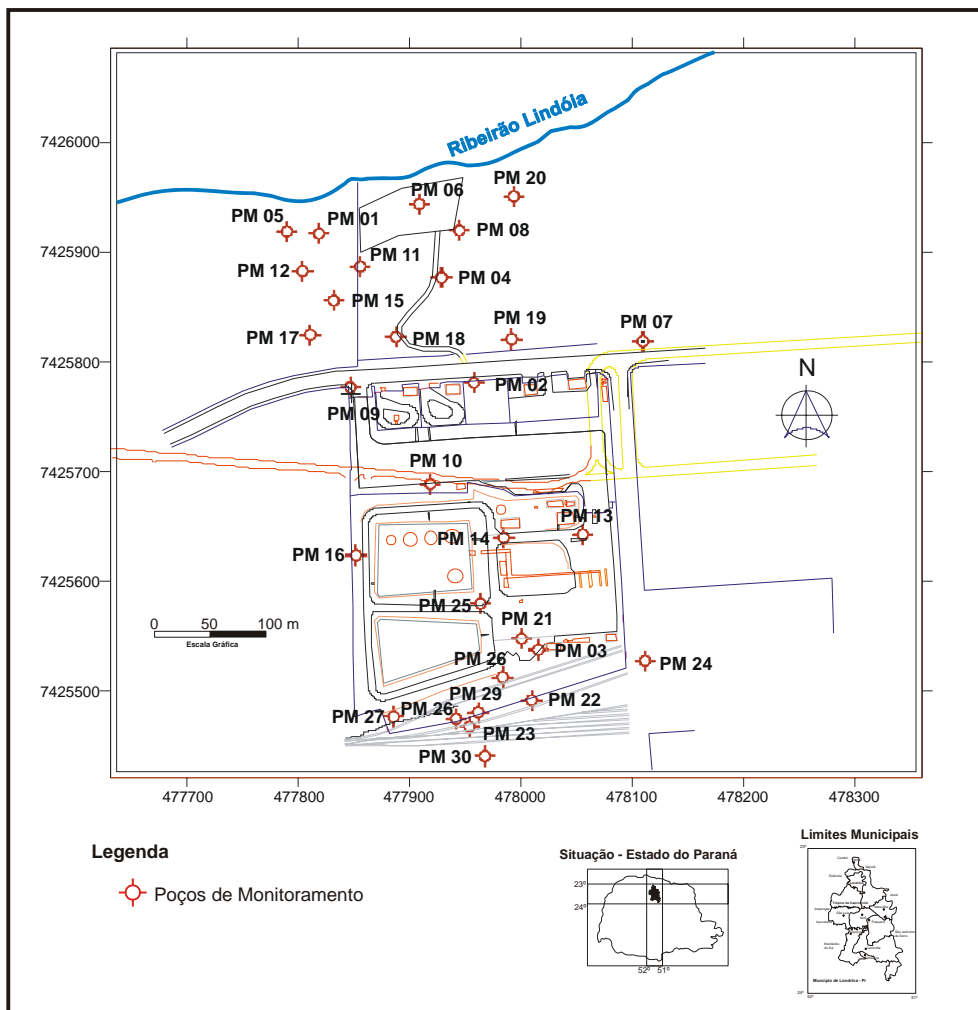
Para este trabalho toda via, a ênfase será dada ao aquífero freático, uma vez que o mesmo é mais susceptível a uma carga poluente, principalmente devido a menor profundidade do nível freático. Esse fator foi essencial para a sua escolha como objeto de estudo para a avaliação de vulnerabilidade natural

## **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Para a avaliação da vulnerabilidade natural a poluição e/ou contaminantes do aquífero freático localizado em uma área no município de Londrina, seguiu-se a cada passo proposto pelo método de trabalho para as definições dos valores de cada parâmetro que será empregado no cálculo do índice DRASTIC.

Os valores para cada parâmetro foram definidos, segundo os dados preexistentes retirados pelo conjunto de poços de monitoramento instalados na área de estudo, além dos trabalhos de campo nos quais envolveram, principalmente, ensaios de infiltrações *in situ* para as definições de condutividade hidráulica, como já salientado.

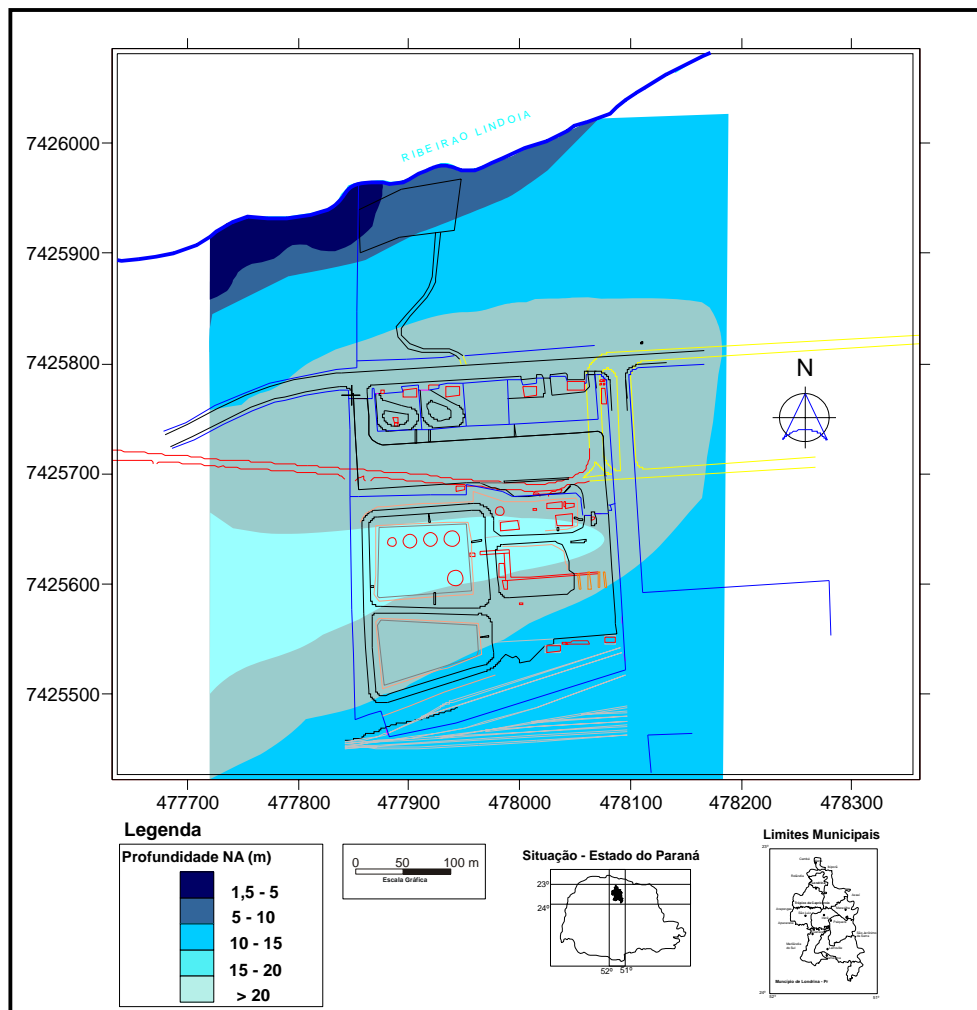
Como se observa na Figura 4, ao todo foram cadastrados 30 poços de monitoramento na vertente direita de uma área a montante do ribeirão Lindóia. Tais poços foram perfurados de acordo com os critérios técnicos pré-estabelecidos segundo a ABNT ([15]1997).



**Figura 4** – Mapa de localização dos poços de monitoramento na área de estudo

### Profundidade do Lençol Freático (D)

A profundidade do lençol freático foi determinada medindo-se os níveis de água dos poços de monitoramento em um período. O valor relativo à profundidade do nível d'água variou de uma profundidade mínima de 3,32 metros próximo à drenagem do ribeirão Lindóia, a 24,12 metros de profundidade nas cotas mais elevadas topograficamente (Figura 5). Tal variação coaduna com as características locais de aquífero livre, pois o lençol freático aproxima-se da superfície à medida que se direciona a drenagem do ribeirão Lindóia.



**Figura 5** – Profundidade do lençol freático segundo as classes de valores.

### Recarga (R)

Os dados referentes à recarga anual foram obtidos a partir do trabalho de Vianna & Celligoi ([16]2002). Os autores utilizaram para o cálculo da recarga o método da curva de recessão de drenagens localizadas no domínio da Formação Serra Geral, no qual envolve a área de estudo. Portanto, como base nesse método apresentado pelos autores acima, a altura média da água infiltrada, ou o que é disponível anualmente pela precipitação como recarga do aquífero freático é de aproximadamente 0,193 metros, ou 193 milímetros.

### Característica do Aquífero (A)

A característica do aquífero baseia-se sobre tudo nas propriedades relacionadas à densidade de fraturas e na permeabilidade intrínseca do solo, quanto maior o valor dessas propriedades, maior o grau de vulnerabilidade para esses aquíferos.

No caso da área de estudo, por se tratar de aquífero essencialmente formado por solo e material alterado e constituir-se num aquífero essencialmente livre, não foram constatados

evidências de fraturamentos. Contudo, inúmeros ensaios de condutividade hidráulica utilizando o permeâmetro Guelph, conduziram ao cálculo da permeabilidade intrínseca do aquífero a partir de Fetter ([17]1988). No geral os resultados encontrados indicam uma permeabilidade intrínseca de  $10^{-8} \text{ cm}^2$  a  $10^{-10} \text{ cm}^2$ , obtendo-se uma média geral de permeabilidade para área em torno de  $10^{-9} \text{ cm}^2$ . Esse resultado indica uma permeabilidade moderada para a área de estudo.

### **Tipo de Solos (S)**

Como dito anteriormente, os tipos de solo predominantes na área de estudo são os Latossolos provenientes do intemperismo das rochas basálticas, na qual possuem textura muito argilosa (superior a 60%).

Essa predominância de argila garante certa proteção para o aquífero freático local, já que à presença de minerais de partículas menores, como os presentes em solos argilosos, retarda o deslocamento vertical do contaminante devido à diminuição do tamanho dos poros no meio e, conseqüentemente, aumentando a capacidade da zona não saturada na retenção de fluídos permitindo, dessa forma, uma maior atenuação natural.

### **Topografia (T)**

Em geral, as declividades da bacia do ribeirão Lindóia são mais amenas próximas aos topos e divisores de água (entre 0 a 10%) e mais acentuada próximo aos fundos de vales, variando entre 10, 20 e até 30% em alguns locais. Na área de estudo, mais especificamente, as variações maiores de declividade são observadas nos locais que margeiam o ribeirão Lindóia. Essas variações oscilam de 0 a 6% nos fundos de vales, e de até 12% nas porções inferiores das encostas; já nos topos a declividade varia entre 0 a 6%, porém com um grande predomínio de baixas declividades, que vão de 0 a 2% o que se traduz em favorecimento da infiltração da água.

### **Impacto da Zona Não Saturada (I)**

No geral, a análise dos perfis das amostras recuperadas nos poços de monitoramento permitiu a identificação, na zona não saturada na área de estudo, a presença de solo de alteração com textura predominante argilo-siltoso, além disso, com o aumento da profundidade foi possível constatar a presença de horizontes com uma granulometria superior em tamanho, se comparado a amostras de solo recuperadas próximos à superfície do terreno. Esses grãos maiores ocorrem devido à presença de fragmentos centimétricos de rocha basáltica alterada, tal característica possibilita, provavelmente, uma maior permeabilidade nessas camadas, porém devido a dificuldades técnicas não foram realizados ensaios de infiltração na zona não saturada nessa profundidade.



Os ensaios de infiltração do tipo *guelph* foram realizados em média a uma profundidade de aproximadamente 45 cm no horizonte B dos latossolos oriundos do basalto. Como visto anteriormente, as permeabilidades intrínsecas calculadas estavam em  $10^{-8}$  cm<sup>2</sup>, em locais com maior permeabilidade a  $10^{-10}$  cm<sup>2</sup> em locais onde os terrenos se apresentavam com maior compactação.

### Condutividade Hidráulica (C)

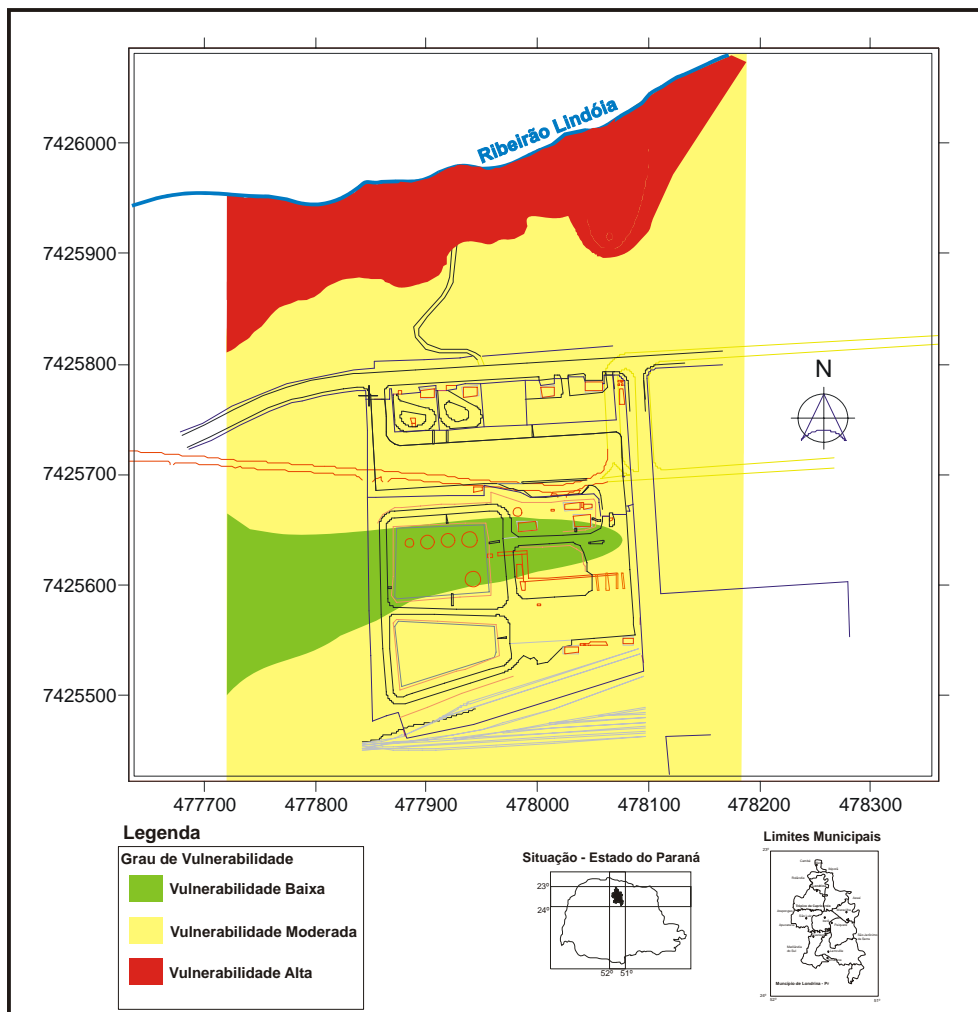
Como mencionado anteriormente, os valores de condutividade hidráulica foram obtidos através de inúmeros ensaios de infiltração utilizando um *Permeâmetro Guelph*. Os resultados encontrados indicaram que o aquífero freático local possui condutividades hidráulicas que variam de  $10^{-3}$  cm/s a  $10^{-5}$  cm/s, caracterizando o solo de alteração como um meio mediantemente permeável a muito permeável.

### Mapa de Vulnerabilidade

O mapa de vulnerabilidade local é a última etapa para a definição final do índice DRASTIC. A função principal dessa etapa é representar cartograficamente todos os intervalos de vulnerabilidade resultantes da interpretação de todos os parâmetros utilizados. Por isso, o mapa representa os dados qualitativos e quantitativos de acordo com o intervalo dos valores propostos (vide Tabela 1). Os resultados alcançados foram organizados na Tabela 3 e a partir daí, foram interpretados de acordo com o modo de ocorrência na área de estudo de onde se obteve o mapa de vulnerabilidade local (Figura 6).

**Tabela 3** - Valores representativos do índice DRASTIC.

Parâmetros	Pesos Relativos (C)	Valor do Parâmetro (P)	Valor Total
Profundidade Nível D'água (D)	5	Varia com a profundidade	-----
Recarga (R)	4	8	32
Características do Aquífero (A)	3	6	18
Solos (S)	2	4	8
Topografia (T)	1	Varia com a declividade	-----
Impacto da Zona Não Saturada (I)	5	7	35
Condutividade (C)	4	Varia com a condutividade	-----



**Figura 6** - Mapa de Vulnerabilidade Natural do aquífero freático local.

Conforme apresentado na Figura 38, os graus de vulnerabilidade natural variam de baixa a alta, mas com predominância na maior parte da área de vulnerabilidade moderada. Como esperado, a profundidade do nível d'água foi o principal fator de ponderação para a construção do mapa acima, pois o aquífero freático local ocorre sobre o manto de alteração que se constitui em um meio poroso homogêneo e livre por toda a sua extensão. A norte e nordeste do mapa de vulnerabilidade, o fator de condutividade foi fundamental condicionador da alta vulnerabilidade.

## CONCLUSÕES

As inúmeras atividades humanas ligadas ao processo desenvolvimentista capitalista provocam inúmeros impactos ao meio ambiente, especialmente nas áreas urbanizadas. Isto se avalia mediante os estudos em Geociências focados na preservação ambiental, que na atualidade estão voltados cada vez mais para a proteção dos recursos hídricos e em especial, os subterrâneos. Para tanto, os índices de vulnerabilidade se constituem em uma ferramenta útil para a proteção e a manutenção da qualidade da água nos aquíferos.

Da mesma maneira, os índices de vulnerabilidade servem como ferramenta na gestão no uso e ocupação do solo, ajudando na definição de sítios aptos para a expansão urbana sem que traga riscos desnecessários aos aquíferos.

Portanto, o produto final gerado através da presente avaliação hidrogeológica, é o mapa de vulnerabilidade natural do aquífero freático localizado em uma área na vertente direita do ribeirão Lindóia. Os resultados evidenciaram vulnerabilidades que variam de baixa a alta, com predomínio de vulnerabilidade moderada. Através do mapa é possível identificar que a vulnerabilidade aumenta com relação à proximidade do ribeirão e torna-se menos vulnerável nos divisores d'água.

Atualmente, a área de indicação envolvendo as vulnerabilidades de alta a moderada é ocupada por atividades que envolvem estocagem e distribuição de combustíveis. Apesar dos estudos indicarem uma certa proteção natural ao aquífero local, essas atividades descritas devem ser continuamente monitoradas devido aos riscos que trazem a qualidade das águas subterrâneas, já à área considerada muito vulnerável, não possui atividades que atribuem sérios riscos. Contudo, esse local não é aconselhável sua ocupação e o que resta de mata ciliar deve ser preservada.

Por fim, os trabalhos aqui efetuados demonstraram a necessidade de estudos para avaliação da vulnerabilidade natural de aquíferos a partir de uma perspectiva ambiental, mesmo em se tratando de áreas relativamente pequenas, como a utilizada para esse trabalho. Os resultados aqui alcançados forneceram subsídios necessários como apoio a tomada de decisão para o monitoramento do aquífero freático local e um possível uso e ocupação do solo nos locais ainda não estabelecidos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AB' SÁBER, A. N. Relevo, estrutura e rede hidrográfica do Brasil. **Boletim Geográfico**, ano XV nº 132, maio – junho, conselho nacional de geografia. Rio de Janeiro, 1956.
- [2] ALLER, L., BENNET, T., LEHR, J.H. e PETTY, R.J. **DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings**. 1987. U.S. EPA Report 600/2-85/018.
- [3] 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 412p.
- [4] CELLIGOI, A; VIANNA, T. R. Análise das reservas de água subterrânea do aquífero Serra Geral em Londrina: Recarga e Consumo. **Anais...**, XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, ABAS. Florianópolis, 2002.
- [5] FREEZE, R. A. & CHERRY, J.A. - 1979 - **Groundwater**. Prentice-Hall inc., New Jersey, 604 p.
- [6] FETTER, C. W. **Applied Hydrogeology**. 3 ed: Prentice Hall, New Jersey, 1988.

- [7] 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.** Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Relatório 179/93 - GIAS, Lisboa, 1993.
- [8] OLIVA, A. **Estudo hidrogeológico da Formação Rio Claro no município de Rio Claro-SP.** Dissertação de mestrado. Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2002.
- [9] NIMER, E. **Climatologia do Brasil** - Rio de Janeiro: IBGE, 2º ed., Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 1989.
- [10] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS -. Construção de Poços de Monitoramento e Amostragem – **NBR 13895.** Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 21 p.
- [11] PETRI, S. FÚLFARO, V. J. **Geologia do Brasil.** EDUSP. São Paulo, SP. 1983.
- [12] ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. **Revista do Departamento de Geografia,** São Paulo: USP, 1994, v.8.
- [13] SCHNEIDER, R. L. et al. Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. **Anais...**, XXVIII Congresso de geologia. Sociedade Brasileira de Geologia. Porto Alegre-RS. 1974.
- [14] SOIL MOISTURE CORP. Model 2800K1, **Guelph Permeameter: Operating Instructions.** Santa Bárbara, CA 93105, 28p.
- [15] VIEIRA S.A. **Manual da ciência do solo.** São Paulo: Agronômica Ceres LTDA. 1995.