

MAPEAMENTO DA VULNERABILIDADE E RISCO DE POLUIÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA REGIÃO METROPOLITANA DE CAMPINAS, SP

Luciana M. R. Ferreira¹; Maria das Graças F. Dantas²; Geraldo Hideo Oda¹;
Mara Akie Iritani¹ & Dorothy C. P. Casarini²

Resumo - O objetivo deste trabalho foi identificar as áreas críticas em relação a vulnerabilidade e risco de poluição das águas subterrâneas na Região Metropolitana de Campinas.

Foram definidos 3 níveis de vulnerabilidade: alto, médio e baixo, divididos em 2 subníveis. Cerca de 21% da Região Metropolitana de Campinas apresentou índice de vulnerabilidade Alto, principalmente nos municípios de Americana, Nova Odessa, Santa Bárbara d'Oeste, Paulínia e Jaguariúna. O índice Alto-alto está relacionado predominantemente aos sedimentos aluvionares com nível d'água inferior a 10 m. O mapeamento da vulnerabilidade se restringiu às rochas sedimentares e foi representado em escala 1:100.000.

Este trabalho identificou e classificou 124 indústrias, 22 áreas de disposição de resíduos sólidos domiciliares, 18 áreas de mineração e 4 lagoas de efluentes domiciliares, além de áreas de saneamento *in situ*. As atividades potencialmente poluidoras foram classificadas em 3 níveis: elevado, moderado e reduzido. Todas as fontes pontuais de poluição foram plotadas em escala de trabalho 1:10.000, sendo a apresentação final na escala 1:100.000.

As áreas críticas foram estudadas e classificadas comparando a vulnerabilidade natural e a carga potencial poluidora. As áreas de maior preocupação ambiental concentram-se em Paulínia, Sumaré, Americana e nas regiões sul e oeste de Campinas.

Palavras-chave - vulnerabilidade, risco, poluição

¹ Instituto Geológico - Av. Miguel Stéfano 3900 - CEP 04301-903 São Paulo/SP - Brasil - Fone/Fax: 55-11-5585-9994 e-mail: lumartin@igeologico.sp.gov.br/ ghoda@igeologico.sp.gov.br/mara.iritani@igeologico.sp.gov.br

1. INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas representam um importante recurso para o abastecimento público. No Estado de São Paulo, dos 645 municípios, 462 (71,6%) são abastecidos total ou parcialmente por águas subterrâneas, sendo que deste total, 308 (47,7%) são municípios totalmente abastecidos por este recurso (CETESB 1997).

A iniciativa de elaborar Políticas de Proteção com a definição de planos que garantam a manutenção da qualidade do recurso hídrico subterrâneo é de suma importância, dentro da situação de criticidade apresentada no âmbito do Saneamento Ambiental no Estado de São Paulo, onde o abastecimento através do recurso hídrico superficial de boa qualidade tem apresentado dificuldades cada vez maiores.

Assim, o planejamento torna-se um instrumento essencial para a implementação de ações preventivas que proteja este recurso de forma sustentável. Partindo-se desta premissa, utilizou-se a metodologia proposta por Foster & Hirata (1988), onde foram identificadas e mapeadas as áreas classificadas como críticas, baseadas fundamentalmente na vulnerabilidade natural (característica intrínseca do aquífero) e na sua interação com a carga potencial poluidora gerada por atividades antrópicas.

A Região Metropolitana de Campinas foi selecionada para o desenvolvimento deste trabalho por representar uma das áreas críticas definidas no "Mapeamento da Vulnerabilidade e Risco de Poluição das Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo" (IG/CETESB/DAEE 1997), onde, além da região de Campinas, também foram identificadas como áreas críticas as regiões de Bauru, São José dos Campos, Ribeirão Preto e Franca, além de toda a área abrangendo o afloramento do Sistema Aquífero Botucatu (Guarani).

Este projeto teve por objetivo a identificação das áreas críticas da Região Metropolitana de Campinas, onde deve-se dar maior atenção dentro de uma Política de Proteção das águas subterrâneas.

A Região Metropolitana de Campinas localiza-se na porção centro-oeste do Estado de São Paulo, a cerca de 100 km da capital paulista, entre os paralelos 22° 25' e 23° 15' de latitude sul e meridianos 46° 30' e 47° 35' de longitude oeste.

A Região Metropolitana de Campinas abrange 18 municípios: Americana, Artur Nogueira, Campinas, Cosmópolis, Engenheiro Coelho, Holambra, Hortolândia, Indaiatuba,

² CETESB - Av. Prof. Frederico Hermann Jr. 345 CEP 05489-900 São Paulo – SP Fone: 55-11-3030-6028 Fax: 55-11-3030-6067 e-mail: mgracasd@cetesb.br/ dorothyc@cetesb.br

Jaguariúna, Monte Mor, Nova Odessa, Paulínia, Pedreira, Santa Bárbara d'Oeste, Santo Antônio da Posse, Sumaré, Valinhos e Vinhedo. Esta área insere-se na 5ª Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI), composta pelas bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (Lei Estadual 7.663 – 1991).

2. CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS AQÜÍFEROS

As unidades aquíferas presentes na RMC podem ser classificadas em: Sistema Aquífero Cristalino, Sistema Aquífero Tubarão (ou Aquífero Itararé), Sistema Aquífero Diabásio, Aquífero Cenozóico e Aquífero Aluvionar.

- O Sistema Aquífero Cristalino é representado por rochas do Embasamento Cristalino, de idade pré-cambriana. É um aquífero do tipo fissural, de caráter eventual, livre a semi-confinado, de extensão regional, heterogêneo, descontínuo e anisotrópico. Dos poços cadastrados neste sistema aquífero, 142 deles possuem informações a respeito da vazão. A vazão média destes poços corresponde a 7,99 m³/h. A capacidade específica de 117 poços apresentou um valor médio de 0,26 m³/h/m. Segundo DAEE (1981), o coeficiente de transmissividade varia de 1 a 100 m²/dia.
- O Sistema Aquífero Tubarão é representado por rochas sedimentares da Formação Itararé e constitui um aquífero granular, livre a semi-confinado, de extensão regional, descontínuo, anisotrópico, localmente contínuo e isotrópico. A vazão média de 541 poços que exploram água exclusivamente deste aquífero foi calculada em 8,27 m³/h. Para o cálculo da capacidade específica média foram utilizados 336 poços, os quais possuíam informações a respeito deste parâmetro. O resultado deste cálculo apresentou um valor médio de 0,25 m³/h/m. De acordo com DAEE (1981) o coeficiente de transmissividade desta unidade é de 1 a 40 m²/dia.
- O Sistema Aquífero Diabásio é representado por rochas intrusivas básicas de idade mesozóica, constituindo um aquífero de caráter eventual, livre a semi-confinado, de extensão limitada, descontínuo, heterogêneo e anisotrópico. Dos poços cadastrados neste sistema aquífero, 36 deles possuíam informações sobre a vazão (6,5 m³/h) e 25 poços possuíam informações sobre a capacidade específica (0,27 m³/h/m). De acordo com DAEE (1981) o coeficiente de transmissividade deste sistema aquífero é de 0,25 a 28 m²/dia.
- O Aquífero Cenozóico é constituído por materiais de cobertura cenozóica (Terciário ao Pleistoceno). É um aquífero granular, livre, de extensão limitada a semi-regional, descontínuo, localmente contínuo, heterogêneo e anisotrópico. Segundo Lopes (1994), a

vazão varia de 1 a 35 m³/h, a capacidade específica varia de 1 a 5 m³/h/m e coeficiente de transmissividade 2 a 50 m²/dia.

- O Aquífero Aluvionar, apesar da falta de dados técnicos a respeito de sua hidrogeologia, supõe-se que a mesma poderá apresentar locais favoráveis em termos de produtividade, após estudos mais detalhados e específicos para esta finalidade. O problema desta unidade, e também da Cobertura Cenozóica, reside no fato do comprometimento da qualidade de suas águas, por serem mais facilmente atingidas por poluentes diversos manuseados na superfície do terreno e também pelo menor grau de consolidação destes sedimentos.

3. METODOLOGIA

CARACTERIZAÇÃO DA VULNERABILIDADE NATURAL

A compartimentação do terreno em diferentes graus de vulnerabilidade natural dos aquíferos da RMC foi realizada de acordo com o método proposto por Foster & Hirata (1988). Este método consiste na obtenção de três parâmetros, que pela multiplicação dos mesmos, é obtido o índice de vulnerabilidade natural, que varia de ponto a ponto, de acordo com as características hidrogeológicas dos mesmos.

O primeiro parâmetro é obtido em função da forma de ocorrência da água subterrânea, sendo atribuída uma pontuação de 0 a 1,0; o segundo parâmetro, que varia de 0,3 a 1,0, é obtido em função dos tipos litológicos encontrados na zona não saturada do aquífero, com a discriminação do seu grau de consolidação (presença ou ausência de permeabilidade por fissuras); o terceiro parâmetro, com variação de 0,4 a 1,0, representa a profundidade do nível d'água (ou o teto do aquífero confinado). Assim sendo, o produto destes três parâmetros resulta no índice de vulnerabilidade natural, expresso numa escala de 0 a 1,0, em termos relativos.

Mapas de vulnerabilidade obtidos através de métodos simplificados como este devem ser interpretados com cuidado e sua validade técnica pode ser assumida desde que fique claro que este índice não se refere a contaminantes móveis e persistentes, que não sofrem retenção significativa ou transformação durante o seu transporte em subsuperfície.

Cabe ressaltar que esta metodologia é aplicável apenas a aquíferos sedimentares. Dessa forma, este trabalho enfocou apenas o Sistema Aquífero Tubarão e os Aquíferos Cenozóico e Aluvionar, localizados na porção ocidental da RMC.

Para a confecção do mapa de vulnerabilidade foram utilizados dados de poços existentes e o mapa geológico compilado de IG (1999).

Parte dos dados de poços utilizados neste trabalho foi obtida a partir do cadastro existente nos estudos de IG (1993 e 1995), que abrangem os municípios de Campinas, Americana, Cosmópolis, Holambra, Hortolândia, Jaguariúna, Nova Odessa, Paulínia e Sumaré.

Também foram utilizados os dados do cadastro existente no estudo de Yoshinaga-Pereira (1996), que abrange toda a RMC e foi baseado em DAEE (1981) e no cadastro do Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo. Estes estudos somam um total de 1.732 poços, locados em mapas 1:10.000, dos quais 418 exploram exclusivamente aquíferos sedimentares e possuem informações sobre a litologia atravessada e/ou a profundidade do nível d'água.

Para complementar o cadastro em municípios e áreas com pouca informação como por exemplo, Artur Nogueira, Monte Mor e Engenheiro Coelho, foi realizado um levantamento junto às principais empresas de perfuração que atuam na região e os poços cadastrados foram locados em mapas 1:10.000.

Do total de poços cadastrados, foram selecionados aqueles que exploram apenas os aquíferos sedimentares para a elaboração do mapa de profundidade do nível d'água.

CARACTERIZAÇÃO DA CARGA POTENCIAL POLUIDORA

A metodologia aplicada neste estudo é uma adaptação proposta com base nos conceitos de Foster & Hirata (1988) e no método definido em IG/CETESB/DAEE (1997).

Para a caracterização do risco de poluição das águas subterrâneas foi estabelecida uma interação entre a vulnerabilidade natural do aquífero e a carga potencial poluidora infiltrada no solo ou aplicada em subsuperfície.

O conceito de carga potencial poluidora refere-se à atividade humana que poderá gerar poluição e alterar a qualidade das águas subterrâneas acima dos padrões de potabilidade. É, portanto, um conceito associado a risco e não indica que a atividade, no momento em que se realiza, esteja causando dano a um aquífero específico. Uma atividade classificada como de elevado potencial não significa necessariamente que seja agressiva ao meio ambiente, ou que não utilize modernas técnicas de tratamento de seus resíduos; pois na verdade, em muitos casos, o risco de geração de poluição está associado ao próprio manuseio de produtos perigosos, aos acidentes, aos vazamentos, etc.

Para a avaliação de risco, a carga poluidora é seguramente a que apresenta maior dificuldade em ser estimada. Dessa forma, foram identificadas as principais atividades

com potencial gerador de carga poluidora em subsuperfície: urbana, industrial e extração mineral.

É fundamental a divisão entre poluição por fontes pontuais (que são mais fáceis de se identificar) e por fontes dispersas.

Foram identificadas as fontes pontuais causadas por atividade industrial, disposição de resíduos sólidos domiciliares, atividade de mineração e lagoas de efluentes domiciliares.

Também foram identificadas as atividades de saneamento *in situ* (áreas residenciais não atendidas por rede de coleta de esgotos), caracterizadas como fontes dispersas de poluição.

LEVANTAMENTO DAS FONTES PONTUAIS

Atividade Industrial

O levantamento das atividades industriais na área de estudo foi realizado a partir do inventário das indústrias cadastradas na CETESB, consultando basicamente os inventários de geração de resíduos sólidos e efluentes industriais de 1995.

As indústrias foram selecionadas por município, com base nos seguintes critérios:

- indústrias que armazenam ou manuseiam produtos ou substâncias corrosivas e tóxicas, tal como descritos na NBR 10.004 (ABNT 1987);
- indústrias que geram resíduos perigosos de acordo com a NBR 10.004;
- indústrias que infiltram resíduos no solo;
- indústrias que armazenam e/ou dispõem inadequadamente sobre o solo resíduos classe II em quantidade superior a 100 t/mês.

Para a avaliação da geração de carga poluidora nestas indústrias previamente selecionadas, adotou-se como método, a análise do processo industrial, que considerou, fundamentalmente, as seguintes variáveis:

- tipo de matéria prima;
- natureza e quantidade dos resíduos sólidos;
- forma de estocagem;
- forma de disposição dos resíduos líquidos (em lagoas), resíduos sólidos (em aterros ou no pátio da indústria- disposição transitória) e manuseio de substâncias perigosas.

Estas variáveis foram avaliadas a partir do preenchimento dos dados cadastrais, para embasar a análise do diagrama de classificação. O resultado desta análise definiu a classificação das indústrias de acordo com o seu potencial de geração de carga poluidora, em elevado, moderado ou reduzido.

O procedimento para a análise deste diagrama considerou algumas premissas destacadas a seguir:

- indústrias que apresentam suspeita de poluição são automaticamente classificadas com potencial poluidor elevado, bem como, para aquelas que manuseiam substâncias perigosas durante o processo produtivo, em quantidades superiores a 300 t/ ano;
- indústrias que geram e armazenam resíduos classe I são classificadas com potencial poluidor elevado, bem como aquelas que armazenam seus resíduos, independente da quantidade, em local não seguro;
- indústrias que geram e armazenam com segurança seus resíduos classe I são classificadas com potencial poluidor moderado;
- indústrias que dispõem ou tratam de forma segura seus resíduos classe I são classificadas com potencial poluidor reduzido;
- indústrias que geram resíduos classe II (>1.200 t/ano) e não os armazenam de forma segura são classificadas com potencial poluidor elevado;
- indústrias que tratam seus efluentes líquidos (lagoas - área >1 ha) ou que infiltram seus efluentes são classificadas com potencial poluidor elevado;
- indústrias que tratam seus efluentes líquidos (lagoas - área entre 0,1 e 1 ha), são classificadas com potencial poluidor moderado;
- indústrias que tratam seus efluentes líquidos (lagoas - área <0,1 ha) são classificados com potencial poluidor reduzido;
- indústrias que possuem mais que 300 empregados e infiltram os efluentes domiciliares são classificadas com potencial poluidor moderado, em casos que possuem menos que 300 empregados são classificadas com potencial poluidor reduzido.

Para as indústrias ligadas às atividades alcooleiras, as premissas adotadas foram as seguintes:

- usinas de açúcar e álcool, destilarias de álcool ou engenhos de aguardente que infiltram em área restrita até 100 m³/d de restilo, são desprezadas ou classificadas com potencial poluidor reduzido;

- usinas e destilarias que infiltram concentradamente entre 100 e 1.000 m³/d de vinhaça são classificadas com potencial de geração de carga poluidora moderado;
- indústrias de açúcar e álcool são classificadas com potencial de geração de carga poluidora elevado quando infiltram, concentradamente em uma pequena área, mais de 1.000 m³/dia.

Também foi admitida que toda fertirrigação com vinhaça é praticada utilizando-se taxas adequadas que não acarretam impacto na qualidade das águas subterrâneas.

Resíduos Sólidos Domiciliares

Neste projeto, a metodologia utilizada para a classificação das áreas de disposição de resíduos sólidos em termos do potencial de risco de poluição baseou-se no Índice de Qualidade de Aterros de Resíduos (IQR), publicado no Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Urbanos (Resolução SMA nº 13 de 27/02/1998). Este índice consiste em avaliar a qualidade dos aterros sob 3 condições: inadequadas, controladas e adequadas. A qualidade é definida pela pontuação alcançada variando de 0 a 10 pontos, onde considera-se 41 variáveis dentro de 3 aspectos básicos: localização, infra-estrutura e condições operacionais, de acordo com o Quadro 1.

Quadro 1 – Índice de Qualidade de Aterros de Resíduos Domiciliares (baseado na Resolução SMA nº 13 de 27/02/98)

IQR	Enquadramento
$0 \leq \text{Índice} \leq 6,0$	Condições Inadequadas
$6,0 < \text{Índice} < 8,0$	Condições Controladas
$8,0 \leq \text{Índice} < 10,0$	Condições Adequadas

Dentre as 41 variáveis do IQR foram selecionadas 14 que são consideradas de significativa relevância para a avaliação de um eventual comprometimento da qualidade das águas subterrâneas.

A classificação das áreas de destinação de resíduos sólidos domiciliares quanto a carga potencial poluidora, foi efetuada nos 18 municípios que integram a Região Metropolitana de Campinas, através da pontuação alcançada num intervalo de 0 a 10 pontos, de acordo com o Quadro 2.

Quadro 2 – Classificação de Local para Disposição de Resíduos Sólidos Domiciliares

Índice	Potencial Poluidor
0 – 6	Elevado

6 – 8	Moderado
8 – 10	Reduzido

Atividade de Mineração

A atividade mineral existente na Região Metropolitana de Campinas foi avaliada do ponto de vista de sua localização, situação e funcionamento, através do banco de dados da CETESB, da pesquisa junto aos técnicos responsáveis pela inspeção e trabalho de campo.

Os principais empreendimentos localizados encontram-se principalmente nas várzeas dos rios Camanducaia, Jaguari e Atibaia, bem como em seus afluentes, de onde são extraídas principalmente areia e argila.

Os trabalhos de campo realizados tiveram como principal objetivo a realização de visitas de reconhecimento às lagoas formadas pela mineração. Estas lagoas foram localizadas de forma precisa (aparelho GPS) em mapas topográficos visando a identificação de áreas de maior risco de poluição das águas subterrâneas.

A carga poluidora gerada pela atividade de mineração e o consequente risco de poluição das águas subterrâneas estão relacionados aos métodos extrativos.

A atividade extrativa dos bens minerais está associada à remoção do solo e da camada não saturada, que acaba por expor o nível freático, reduzindo a capacidade de degradação dos poluentes no perfil geológico e aumentando consequentemente a vulnerabilidade do aquífero.

A geração de cargas poluidoras está relacionada principalmente à utilização das cavas abandonadas, que são normalmente utilizadas para estocagem de rejeitos de materiais, como local para deposição de lixo, depósito de tambores de combustíveis e também como sistemas de lagoas de decantação.

Lagoas de Efluentes Domiciliares

O uso de lagoas para armazenamento, manejo, evaporação, sedimentação e oxidação de efluentes de sistemas de esgotamento sanitário municipais ou de atividades industriais ou minerais é muito difundido. As lagoas que são constituídas dentro das áreas industriais e de mineração não foram consideradas, pois elas foram tratadas separadamente como fontes pontuais de carga poluidora.

As lagoas de estabilização das águas residuárias municipais normalmente contêm grandes quantidades de matéria orgânica, elevadas populações de patógenos e altas concentrações de nutrientes. Normalmente são incluídos, também, efluentes de indústrias

de pequeno porte (tais como oficinas de automóveis, lavanderias, tinturarias, processadores fotográficos, etc.), que contribuem com alguns compostos organo-sintéticos, como solventes e desinfetantes.

Ao caracterizar a carga contaminante no subsolo, gerada pela presença de tais lagoas, é necessário considerar os seguintes fatores:

- a quantidade do líquido na lagoa;
- a qualidade e concentração de contaminantes, que pode ocorrer durante a infiltração.

Como a quantidade e qualidade dos líquidos que se infiltram nas lagoas não são fáceis de serem caracterizados, adotou-se como critério de classificação a situação mais crítica. Assim, o potencial poluidor em lagoas foi classificado como elevado.

FONTES DISPERSAS

Saneamento *in situ*

Em áreas urbanizadas sem rede de esgoto, a utilização de saneamento *in situ*, como as fossas negras e sépticas, representam uma fonte potencial de poluição das águas subterrâneas. Nessas áreas, considera-se também a existência de pequenas indústrias, oficinas mecânicas, postos de gasolina, etc., que potencialmente podem gerar cargas poluentes consideráveis.

A contaminação das águas subterrâneas pode ser causada por acidente, pelo rompimento de fossas sépticas, pela proximidade entre a fossa e o poço de captação de água potável, e pela proximidade do nível d'água subterrânea. As principais enfermidades relacionadas à contaminação das águas subterrâneas por sistema de fossas sanitárias são causadas por agentes biológicos (microorganismos patogênicos) e principalmente por nitrato.

A avaliação da carga poluidora urbano-residencial, em cada município, foi realizada com base nas informações obtidas pela Regional da CETESB sobre a população servida por rede de esgoto e a população total da área urbana. Com base nesses dados, diferenciou-se a população não assistida por rede de esgoto. Desses valores, calculou-se a geração anual de carga de nitrogênio-nitrato (N-NO_3^-) por tal população, considerando-se que cada habitante seja responsável pela geração de 4 kg N-NO_3^- /ano (Foster & Hirata 1988).

Essa quantidade de N-NO_3^- /ano foi utilizada para a classificação dos índices de cargas potenciais poluidoras em 3 níveis: reduzido, moderado e elevado, associados aos valores de <20.000 kg N-NO_3^- /ano, 20.000 a 50.000 kg N-NO_3^- /ano e > 50.000 kg N-NO_3^- /ano, respectivamente.

O ideal seria ter a cartografia da área urbanizada sem rede de esgoto em cada município. Tal informação, entretanto, é de difícil obtenção. Sem a definição precisa da densidade populacional, optou-se por avaliar a carga de nitrogênio-nitrato (N-NO_3^-) gerada por município (somente na área urbana), não considerando processos de diluição, que são importantes para a estimativa do impacto do nitrato nas águas subterrâneas.

Estabelecimento de Áreas Críticas

A vulnerabilidade natural do aquífero foi definida e representada em mapa na escala 1:100.000, com a delimitação das distintas áreas, individualizando os seis níveis de classificação (alto, médio e baixo, em dois subníveis, alto e baixo).

As fontes potenciais de poluição, a partir de método específico, foram classificadas nos seguintes índices: reduzido, moderado e elevado perigo de geração de carga poluidora. Foi elaborado um mapa contendo as cargas potenciais poluidoras pontuais, em escala de trabalho 1:100.000, possibilitando o cruzamento com o mapa de vulnerabilidade natural.

A representação cartográfica das fontes pontuais baseou-se em Foster & Hirata (1988) e IG/CETESB/DAEE (1997), utilizando símbolos coloridos e geométricos para indicar a atividade e o grau de potencial de geração de carga.

As cargas poluidoras dispersas tiveram outro tratamento na representação cartográfica. Dada a impossibilidade de se obter a área e localização precisa das fontes potencialmente poluidoras, a unidade mínima considerada foi a área urbana do município.

De posse dos mapas de vulnerabilidade natural dos aquíferos e de carga poluidora, procedeu-se à sobreposição das informações, onde os índices da carga poluidora foram confrontados com os de vulnerabilidade.

A existência de carga poluidora de perigo potencial elevado ou moderado, em áreas de vulnerabilidade média ou alta, serve para dar indicações preliminares do risco de poluição das águas subterrâneas.

É importante notar que este procedimento é um passo inicial para se avaliar o risco de poluição das águas subterrâneas e deveria ser utilizado para definir prioridades em programas contínuos de investigação e monitoramento em campo, apropriado às condições hidrogeológicas e à natureza da carga poluidora ao subsolo.

O Quadro 3 agrupa as nove possibilidades de combinação em três níveis hierárquicos de risco de poluição. É importante lembrar que tal classificação não permite comparar entre si atividades diferentes, como saneamento e indústria.

Quadro 3 - Definição qualitativa do risco de poluição das águas subterrâneas a partir dos índices de vulnerabilidade e carga poluidora potencial (Foster & Hirata 1988)

		VULNERABILIDADE NATURAL		
		Baixa	Média	Alta
Carga Poluidora Potencial	Reduzida	Baixo III	Baixo III	Moderado II
	Moderada	Baixo III	Moderado II	Alto I
	Elevada	Alto I	Alto I	Alto I

(os números de I a III representam os grupos de maior para menor risco de poluição)

4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Caracterização da Vulnerabilidade Natural

A metodologia utilizada permitiu definir a vulnerabilidade natural dos aquíferos sedimentares da Região Metropolitana de Campinas, cuja escala de apresentação adotada foi 1:100.000.

Como visto anteriormente, no método proposto para a avaliação da vulnerabilidade natural dos aquíferos (Foster & Hirata 1988) são considerados três fatores: tipo de ocorrência do aquífero, litologia e profundidade do nível d'água ou espessura da zona não saturada.

A forma de ocorrência dos aquíferos sedimentares da área é predominantemente livre, não apresentando, de forma geral, características de confinamento. A pontuação para esta característica foi de 0,9 para os aquíferos Cenozóico e Aluvionar.

O Aquífero Itararé foi considerado um aquífero não confinado, entretanto, podendo apresentar uma cobertura, representada pelos sedimentos cenozóicos e recentes, resultando em uma pontuação entre 0,6 e 0,8 como mostra o Quadro 4.

Quadro 4 – Definição dos índices de vulnerabilidade dos aquíferos sedimentares

Tipo de Aquífero	Litologia			Profundidade do NA			
				0,9	0,8	0,7	0,6
				< 5 m	5-10 m	10-20m	> 20 m
0,9	0,85	Aluvião	Av	0,69 Aa	0,61 Aa	0,54 Ab	0,46 Ma
0,9	0,80	Sedimentos Cenozóicos Arenitos finos, pelíticos, maciços Lamitos e arenitos pelíticos	Cz Czr Czl	0,65 Aa	0,58 Ab	0,50 Ab	0,43 Ma
0,9	0,75	Argilitos, siltitos e arenitos	Cza	0,61 Aa	0,54 Ab	0,47 Ma	0,41 Ma
0,80	0,75	Arenitos médios e grossos Sedimentos da Fm. Itararé	Am Li	0,54 Ab	0,48 Ma	0,42 Ma	0,36 Mb
0,7	0,70	Arenitos finos	Af	0,44 Ma	0,39 Mb	0,34 Mb	0,29 Ba
0,6	0,65	Siltitos Ritmitos	St Rt	0,35 Mb	0,31 Mb	0,27 Ba	0,23 Ba
0,6	0,60	Lamitos com seixos Lamitos	Ls Lr	0,32 Mb	0,29 Ba	0,25 Ba	0,22 Ba

Índices de Vulnerabilidade

A – Alto a - alto

M –Médio b - baixo

B – Baixo

Esta característica de aquífero não confinado, mas coberto, ocorre principalmente na porção central e norte da área, onde há grandes áreas de ocorrência dos depósitos sedimentares cenozóicos.

Outra característica considerada na avaliação da vulnerabilidade dos aquíferos sedimentares é o arcabouço litológico que sustenta as formações geológicas.

O principal aquífero sedimentar da área estudada é o Aquífero Itararé, que ocupa cerca de 43% da Região Metropolitana de Campinas e, apesar de sua baixa produtividade, é explorado por centenas de poços.

Os litotipos que compõem esta unidade variam de lamitos e ritmitos a arenitos médios e grossos, consolidados, que, segundo a metodologia proposta, foram pontuados entre 0,60 e 0,75 como mostra o Quadro 4. Nesta classificação das diferenciações litológicas do aquífero não foram consideradas as estruturas tectônicas, como falhas e fraturas, muitas vezes presentes na área. Isto deveu-se ao fato de não existirem estudos

aprofundados sobre o assunto nesta região e porque a metodologia proposta por Foster & Hirata (1988) contempla somente as características sedimentares dos aquíferos.

Sobrepostos à Formação Itararé, os sedimentos cenozóicos, com ocorrência principalmente na porção central e centro-oeste da RMC, ocupam apenas cerca de 17% da área total.

De constituição mais arenosa e inconsolidada, esta unidade aquífera apresenta-se com pontuação da litologia entre 0,75 e 0,80, imprimindo uma maior vulnerabilidade à poluição que os sedimentos da Formação Itararé.

A maior pontuação encontrada na RMC para o termo litologia foi para os sedimentos aluvionares (pontuação 0,85), de constituição predominantemente arenosa e inconsolidados.

De forma geral, na área de estudo, a superfície potenciométrica acompanha a topografia do terreno, corroborando o comportamento não confinado do aquífero. Observou-se na área que nos aquíferos sedimentares a profundidade do nível d'água varia de acordo com a elevação topográfica. Nas porções mais elevadas, o lençol freático encontra-se mais profundo, podendo superar os 40 m.

Nas áreas próximas às drenagens, o lençol freático aproxima-se da superfície do terreno, influenciando diretamente no aumento da vulnerabilidade dos aquíferos. Este fato é observado nas planícies de inundação das principais drenagens da região, como nos rios Atibaia, Jaguari, Quilombo, Capivari, Capivari Mirim e Jundiáí.

A influência da profundidade do nível d'água é marcante na caracterização da vulnerabilidade dos aquíferos, como mostram as áreas mais vulneráveis, que de maneira geral, sempre acompanham a distribuição das drenagens.

As profundidades do nível da água avaliadas foram 5, 10, 20 e superior a 20 m, cuja pontuação foi multiplicada aos outros fatores avaliados para a determinação do índice de vulnerabilidade, como mostra o Quadro 4.

Este estudo mostrou que, de forma geral, predominam na Região Metropolitana de Campinas, áreas com índices de vulnerabilidade Médio, principalmente nas porções norte e sul da área estudada.

As porções com vulnerabilidade Baixa e Média-baixa predominam no Aquífero Itararé, principalmente nas áreas com predomínio de sedimentos pelíticos como os lamitos, siltitos e ritmitos (Quadro 4). Estas regiões com vulnerabilidade Baixa-alta e Média-baixa ocupam cerca de 22% da RMC e ocorrem predominantemente nas porções norte e centro sul da área estudada, abrangendo parte dos municípios de Artur Nogueira, Cosmópolis e Campinas.

O índice de vulnerabilidade Médio-alto ocupa cerca de 20% da RMC, distribuindo-se por toda a área de estudo. Grandes porções com vulnerabilidade Média-alta são observadas na região sul, abrangendo partes dos municípios de Monte Mor, Indaiatuba e sul de Campinas, onde predomina o Aquífero Itararé com profundidades do nível d'água inferiores a 20 m (Quadro 4). Nas áreas de ocorrência do Aquífero Cenozóico, com nível d'água profundo (superior a 20 m), o índice de vulnerabilidade calculado também foi classificado como Médio-alto, como nas regiões de Holambra e sul de Santa Bárbara d'Oeste.

Os índices de vulnerabilidade Alta-alta e Alta-baixa ocupam cerca de 21% da RMC e predominam nos sedimentos cenozóicos e nos aluviões, com ocorrência principalmente na porção oeste, em Americana, Nova Odessa e Santa Bárbara d'Oeste, e na porção centro-norte da RMC, na região de Paulínia e Jaguariúna. Em Engenheiro Coelho também observa-se índices de vulnerabilidade Alta, associados aos sedimentos cenozóicos e aluviões. O índice Alto-alto está associado predominantemente aos aluviões com nível d'água inferior a 10 m, sendo expressivo em área no município de Jaguariúna e no sul de Indaiatuba. Este índice também associa-se às áreas com sedimentos cenozóicos e nível d'água raso, como mostra o Quadro 4.

Os sedimentos cenozóicos e aluviões apresentam um maior índice de vulnerabilidade em função de sua constituição inconsolidada e por serem recentes, apresentam pequeno manto de intemperismo, portanto, pequena cobertura, o que implica em uma maior suscetibilidade à poluição que os sedimentos do Aquífero Itararé.

FONTES PONTUAIS DE POLUIÇÃO

Atividade Industrial

Foram selecionadas e classificadas quanto a carga potencial poluidora um total de 124 indústrias.

Entre os principais fatores que definiram a classificação dessas indústrias destaca-se a quantidade gerada e armazenada de resíduo sólido classe I (perigosos) e manuseio de substâncias tóxicas e corrosivas, dentre elas os hidrocarbonetos, solventes clorados e metais. Dos constituintes orgânicos, apresentam maior ameaça às águas subterrâneas, aqueles relativamente solúveis na água, como os alcanos e alquenos.

As indústrias com suspeita de contaminação totalizaram treze: 3 em Paulínia, 2 em Campinas, 2 em Cosmópolis, 2 em Sumaré, 1 em Americana, 1 em Indaiatuba, 1 em Hortolândia e 1 em Valinhos.

Do total de empreendimentos, 70 indústrias (56,5%) apresentam potencial elevado, 42 (33,9%) potencial moderado e 12 (9,6%) potencial reduzido.

A indústria química é a atividade que apresenta o maior risco potencial de poluição para as águas subterrâneas, enquanto a alimentícia é a atividade de menor risco. As indústrias químicas classificadas com elevado potencial poluidor somaram 32 (80%), 7 com moderado (17,5%) e 1 com reduzido (0,5%). Segue a indústria mecânica, com 5 indústrias classificadas (80%) com elevado potencial e a metalúrgica, com 10 classificadas (45%).

Os municípios que apresentaram o maior número de indústrias com elevado potencial poluidor são: Campinas, Paulínia, Americana e Sumaré.

O município de Campinas destacou-se, pois possui o maior número de indústrias classificadas com elevado potencial poluidor (18).

Os municípios que apresentaram indústrias com potencial poluidor reduzido foram: Artur Nogueira, Engenheiro Coelho, Pedreira, Santa Bárbara d'Oeste e Vinhedo, gerando portanto, um menor risco de poluição aos aquíferos.

Quanto às usinas de açúcar e álcool da área em estudo observou-se que atualmente todas utilizam seu restilo para fertilização com taxas adequadas e o armazenamento apresentado não oferece problemas de infiltração. Por esta razão, as usinas não foram selecionadas para serem classificadas quanto ao potencial poluidor gerado.

Resíduos Sólidos Domiciliares

Os tipos de destinações de resíduos sólidos domiciliares encontrados foram: 12 lixões e 10 aterros sanitários. As áreas classificadas com elevado potencial poluidor totalizaram 20 (91%), 1 (4,5%) com moderado potencial e 1 (4,5%) com reduzido. Destas áreas 5 lixões (Artur Nogueira, Campinas, Cosmópolis, Jaguariúna, Paulínia e Santo Antônio da Posse) e 6 aterros sanitários (Monte Mor, Valinhos, Hortolândia, Santa Bárbara d'Oeste, Pedreira e Nova Odessa) apresentam suspeitas de contaminação.

A distinção entre lixões e aterros sanitários prevê apenas um cuidado maior a estes últimos, mas não permite assegurar que todos tenham sido construídos de forma a não comprometer os aquíferos subjacentes, nem tão pouco que os aterros recebam apenas produtos classificados como de classe II (resíduos sólidos não inertes mas não perigosos) e classe III (resíduos sólidos inertes) (IG/CETESB/DAEE 1997).

A clandestinidade e a inadequada disposição de resíduos de classe I (perigosos) é ainda praticada e uma das maiores preocupações ambientais envolvendo as águas subterrâneas.

Atividade de Mineração

O cadastro realizado identificou 18 áreas com potencial de poluição das águas subterrâneas por atividade de mineração. Dentre estas áreas, 5 apresentam potencial elevado e 13 moderado. Destas áreas, 17 encontram-se somente no município de Jaguariúna e 1 em Campinas.

Lagoas de Efluentes Domiciliares

Foram identificadas 2 lagoas em Artur Nogueira, uma em Indaiatuba e uma em Valinhos. Conforme dito anteriormente, a quantidade e qualidade dos líquidos que se infiltram nas lagoas não são fáceis de serem caracterizados, portanto, estas foram classificadas com potencial poluidor elevado.

FONTES DISPERSAS DE POLUIÇÃO

Saneamento *in situ*

Verificou-se que em apenas 4 municípios a totalidade da população urbana não é servida por rede de coleta de esgotos, sendo eles: Americana, Hortolândia, Nova Odessa e Vinhedo.

O município de Hortolândia apresentou a menor porcentagem de rede coletora (90%), gerando uma carga de 34.080 kg N-NO₃⁻/ano.

O município de Americana possui 95% da população urbana servida por rede de coleta, 5% a mais que Hortolândia, mas por ter maior população, a quantidade de carga gerada é maior (38.000 kg N-NO₃⁻/ano). Estes dois municípios foram os únicos que apresentaram carga potencial poluidora moderada. Os municípios de Nova Odessa e Vinhedo geram pequenas cargas de nitrato (4.400 e 7.000 kg), sendo assim classificados com reduzido potencial poluidor. Os demais municípios que tem 100% da população com rede de coleta de esgoto, também foram classificados com reduzido potencial poluidor.

Principalmente os dois municípios citados anteriormente (Americana e Hortolândia) que geram carga poluidora e com isso, apresentam risco de poluição às águas subterrâneas, podem ser considerados como prioritários para realização de estudos que analisem, com detalhe, as áreas não servidas por rede coletora de esgotos e o impacto da disposição *in situ* das cargas dos efluentes domiciliares.

Áreas Críticas

O projeto classificou a vulnerabilidade natural em três níveis (alto, médio e baixo), com dois subníveis (alto e baixo); da mesma forma as cargas potenciais poluidoras associadas às atividades industriais, mineração, áreas de disposição de resíduos sólidos domiciliares, lagoas de efluentes domiciliares e saneamento *in situ* foram hierarquizadas em três níveis de risco de geração de carga (elevado, moderado e reduzido).

A definição e hierarquização de áreas críticas foram estabelecidas a partir de critérios qualitativos, cuja matriz é apresentada no Quadro 3.

A identificação das áreas críticas permite uma hierarquização das cargas poluidoras de cada atividade antrópica, identificando as áreas que apresentam maiores riscos ambientais, possibilitando definir prioridades de ações no trato de questões ambientais que envolvem as águas subterrâneas.

É importante mencionar que os riscos associados a uma atividade específica não deverão ser comparados com os de outras atividades. A classificação aqui apresentada tem significado quando analisadas as cargas poluidoras dentro de uma mesma atividade. Cada atividade possui riscos inerentes à forma com que é conduzida, tendo recomendações específicas para uma operacionalidade segura.

A classificação e cartografia de 124 indústrias na Região Metropolitana de Campinas, comparadas e analisadas junto aos índices de vulnerabilidade, permitiram definir 3 grupos de risco de poluição das águas subterrâneas (ou áreas de risco). Dentre estas indústrias, 85 estão localizadas em áreas onde foi definido o índice de vulnerabilidade. Como resultado obteve-se que 67 indústrias apresentam risco Alto de poluição ao recurso hídrico subterrâneo (Grupo I), 14 Moderado (Grupo II) e 4 Baixo (Grupo III).

Quanto as áreas de disposição de resíduos sólidos domiciliares, das 22 classificadas, 20 apresentaram risco Alto (Grupo I) de poluição das águas subterrâneas e 2 apresentam risco Baixo (Grupo III) de poluição.

Quanto à atividade de mineração, 17 (todas no município de Jaguariúna) apresentaram risco Alto de poluição (Grupo I) e a única atividade classificada no município de Campinas apresentou risco Moderado (Grupo II).

As 4 lagoas de efluentes domiciliares por terem sido classificadas com potencial elevado de poluição apresentam risco Alto (Grupo I), mesmo nos locais onde o índice de vulnerabilidade não foi definido (2 lagoas em Artur Nogueira – Aquífero Diabásio).

Para inferir o grau de perigo potencial de geração de carga de nitrogênio no aquífero pela atividade de saneamento *in situ* de forma mais precisa, seria necessário estabelecer

a densidade populacional não atendida pela rede de esgoto em cada município, bem como a abrangência desta rede e a urbanização.

Neste projeto foi possível uma quantificação relativa da carga de nitrato da área urbana em cada município, estabelecida a partir do número absoluto de pessoas não-servidas por rede de esgoto. A definição de áreas de risco foi prejudicada pela falta de espacialização precisa dos bairros sem rede de esgoto.

Os municípios de Americana e Hortolândia apresentaram risco Alto por possuírem carga potencial poluidora Moderada em área de Alta vulnerabilidade. Municípios como Sumaré, Santa Bárbara d'Oeste, Cosmópolis e Holambra apresentaram risco Moderado, apesar de terem sido classificados com Reduzido potencial de poluição. Todos os demais municípios apresentaram Baixo risco de poluição das águas subterrâneas por atividade de saneamento *in situ*.

5. CONCLUSÕES

O método utilizado para a cartografia de vulnerabilidade permitiu a produção de um mapa na escala 1:100.000, distinguindo, em unidades aquíferas sedimentares na Região Metropolitana de Campinas, um zoneamento da área em 3 níveis, com dois subníveis cada, com diferentes graus de susceptibilidade à poluição. A cartografia dos aquíferos de porosidade secundária não foi objeto deste estudo, uma vez que a grande heterogeneidade do meio não permitiu, nesta escala, interpolar informações entre os pontos de água.

O mapa de vulnerabilidade analisou 3 unidades litoestratigráficas sedimentares (Aquífero Itararé, Cenozóico e Aluvionar) valorando relativamente suas características do tipo de rocha para a atenuação/transporte de poluentes e sua situação hidráulica. Os níveis d'água considerados foram < 5 m, 5 a 10 m, 10 a 20 m e >20 m.

Os maiores índices de vulnerabilidade (Alta-alta e Alta-baixa) ocupam cerca de 21% da RMC e predominam nos sedimentos cenozóicos e nos aluviões, com ocorrência principalmente nos municípios de Americana, Nova Odessa, Santa Bárbara d'Oeste, Paulínia, Jaguariúna e Engenheiro Coelho. O índice Alto-alto está associado predominantemente aos aluviões com nível d'água inferior a 10 m, sendo expressivo em área no município de Jaguariúna e no sul de Indaiatuba.

Dentre cargas pontuais estudadas, foram cadastradas e classificadas 124 indústrias, 22 áreas de disposição de resíduos sólidos domiciliares, 18 áreas de mineração e 4 lagoas de efluentes domiciliares.

Do total de indústrias, 70 apresentaram potencial elevado, 42 potencial moderado e 12 potencial reduzido. Quanto às áreas de disposição de resíduos, 20 apresentaram elevado potencial, 1 moderado e 1 reduzido. Das 18 áreas de mineração, 17 apresentaram potencial elevado e 1 moderado. As 4 lagoas de efluentes domiciliares classificadas apresentaram potencial elevado de poluição.

Quanto ao saneamento *in situ*, os municípios de Americana e Hortolândia apresentaram risco Alto, Sumaré, Santa Bárbara d'Oeste, Cosmópolis e Holambra apresentaram risco moderado e os demais municípios risco Reduzido.

As áreas críticas foram estudadas e classificadas comparando a vulnerabilidade natural e a carga potencial poluidora. As áreas de maior preocupação ambiental concentram-se em Paulínia, Sumaré, Americana e nas regiões sul e oeste de Campinas.

Numa estratégia voltada para os empreendimentos já instalados, aqueles classificados no Grupo I (maior risco), seguidos dos Grupos II e III, deveriam ter prioridade em estudos de detalhamento, em conjunto com uma análise do uso de água do local. Estudos hidrogeológicos e de impactos poderão definir se as suspeitas de risco se comprovam e se será necessário exigir medidas para redução do risco, como programas de monitoramento preventivos. Em empreendimentos ainda a serem instalados, o mapa de vulnerabilidade poderá servir de ferramenta balisadora nas decisões de estudos prévios e níveis de exigências.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). 1997. Uso das águas subterrâneas para abastecimento público no Estado de São Paulo. CETESB, São Paulo. 48 p.
- DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA (DAEE). 1981. *Estudo de águas subterrâneas*. Região Administrativa 5 - Campinas. DAEE/SOMA/SP. São Paulo. 2 v.
- FOSTER, S.S.D. & HIRATA, R.C.A. 1988. *Groundwater pollution risk evaluation: the methodology using available data*. CEPIS/PAHO/WHO. Lima, Peru. 78 p.
- INSTITUTO GEOLÓGICO (IG). 1993. *Subsídios do meio físico-geológico para o planejamento urbano-territorial no eixo Sorocaba-Campinas*. Município de Campinas. IG/SMA. 3 v.
- INSTITUTO GEOLÓGICO (IG). 1995. Subsídios para o planejamento regional e urbano do meio físico na porção média da Bacia do Rio Piracicaba, SP. IG/SMA. São Paulo. 4 v.

- IG/CETESB/DAEE. 1997. Mapeamento da vulnerabilidade e risco de poluição das águas subterrâneas no Estado de São Paulo. IG/CETESB/DAEE. v.1. 144 p.
- INSTITUTO GEOLÓGICO (IG). 1999. Metodologia para seleção de áreas para tratamento e disposição final de resíduos sólidos. São Paulo, Instituto Geológico. Relatório Técnico.
- LOPES, M.F.C. 1994. *Condições de ocorrência de água subterrânea nas bacias dos rios Piracicaba e Capivari*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas. 83 p.
- YOSHINAGA-PEREIRA, S. 1996. *Proposta de representação cartográfica na avaliação hidrogeológica para o estudo de planejamento e meio ambiente, exemplo da Região Metropolitana de Campinas - SP*. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo. 190 p.