

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**ESTIMATIVA DA VULNERABILIDADE DE AQÜÍFEROS UTILIZANDO
SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA E GEOESTATÍSTICA –
UGRHI-PCJ.**

Alexandre de Silvio Russo

Orientador: Prof. Dr. Fábio Taioli

**SÃO PAULO
2009**

*“Experiência não é aquilo que acontece com um homem;
é o que o homem faz com aquilo que lhe acontece”*
Aldous Huxley

À minha amada Vovó

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo pelo excelente ambiente de aprendizado, pesquisa e excelência, assim como aos funcionários (as) da seção de pós-graduação e manutenção do Instituto, que sempre se mostram prontos e altamente qualificados. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pela bolsa auxílio que me subsidiou no início desta pesquisa.

Ao meu professor, colega e amigo Dr. Fábio Taioli pela orientação da dissertação, e apoio para a evolução da minha experiência acadêmica, desde a graduação. Ao Prof. Dr. Marcelo Monteiro Rocha, pela admirável disposição e auxílio a partir do momento em que julguei necessária a aplicação geoestatística na pesquisa.

Ao geólogo Silvio Saad por todas as horas de trabalho concedidas pela Petrus Consultoria Geológica, para assim conduzir o mestrado em paralelo ao exercício da profissão.

Aos meus grandes amigos geólogos Bruno Calado (Chuck Nóia), Renato Pinto (Lesma), Enos (Rosa Selvagem) e Robercal (Mônica), pelo coleguismo e presença nos momentos bons e ótimos do mestrado.

À minha amada Mãe, intelectual Pai e idealista Irmão.

E, por fim, mas em primeiro lugar, à minha querida esposa Hellen Sheila que me apoiou em todas as circunstâncias, e por todas as decisões que tomamos nesses cinco anos de intenso convívio.

RESUMO

A estimativa da vulnerabilidade natural de aquíferos é uma das primeiras tarefas a ser realizada para o planejamento, controle e prevenção da qualidade das águas subterrâneas e criação de perímetros de proteção para as mesmas.

Nesse estudo o modelo GOD (G - groundwater confinement, O - overlay strata e D - depth to groundwater) (FOSTER et al. 1998) foi adotado para a estimativa da vulnerabilidade natural dos aquíferos pertencentes à Unidade de Gerenciamento dos Recursos Hídricos do Estado de São Paulo das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí, sendo realizada uma extensa pesquisa sobre as características fisiográficas e ambientais da área de estudo, e critérios hidrogeológicos adotados para a estimativa de vulnerabilidade de aquíferos.

O modelo GOD utiliza como parâmetros o tipo de confinamento da água subterrânea, a litologia da zona vadosa e a profundidade do nível da água. Para a elaboração do respectivo mapa, foram adotados como base de dados o Mapa Geológico do Brasil ao Milionésimo (CPRM, 2004) e o Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo (DAEE, IG, IPT e CPRM, 2005).

Apesar da notoriedade do modelo GOD e de sua extensa aplicação no Brasil e América Latina, foi sugerido ao final dessa pesquisa a inclusão da pluviometria como quarto parâmetro a ser considerado ao modelo GOD para a elaboração de mapas de vulnerabilidade em escalas inferiores a 1:250.000.

Como incremento à pesquisa acadêmica, foram aplicados métodos geoestatísticos como a krigagem residual para a interpolação dos dados de elevação de cinco imagens SRTM, a análise de regressão múltipla dos índices pluviométricos anuais obtidos pelas estações pluviométricas do DAEE presentes na região e, a krigagem com deriva externa dos dados de saída da análise de regressão múltipla.

Os mapas de vulnerabilidade, assim como as figuras dos resultados da krigagem residual das imagens SRTM e krigagem por deriva externa dos índices pluviométricos médios anuais, foram desenvolvidos utilizando o software específico para integração de Sistemas de Informação Geográfica "SIG".

ABSTRACT

The natural aquifer vulnerability estimative is one of the primary tasks to be accomplished for a groundwater planning, control and prevention program, that would for example aim a protection perimeter design for human use or environmental protection.

In this study the GOD model (G from groundwater confinement; O from overlay strata; D from depth to groundwater) (FOSTER et al. 1998) was applied for the natural groundwater vulnerability estimative of Sao Paulo State Water Resource Management Unit of the Hydraulic Basins of Piracicaba, Capivari and Jundiaí. An intensive bibliographic research related to physiographic and environmental characteristics from the researched area, and hydrogeologic criteria used for aquifer vulnerability estimative were also included.

The GOD model uses as parameters the type of groundwater confinement, the vadoze zone representative litology and depth to groundwater in meters. To perform the estimative analysis and map elaboration the Brazilian Geologic Map 1:1.000.000 (CPRM, 2004) and the Sao Paulo State Groundwater Map (DAEE, IG, IPT and CPRM, 2005) were used as input database.

In spite of the fact that the GOD model is well known and have been extensively applied both in Brazil and South America, it was suggested in this study the insertion of a pluviometric index as a fourth parameter to be considerate in the GOD model, for a groundwater vulnerability estimative in scales lower than 1:250.000.

As an increment for academic research, it was also applied geostatistic methods as residual krigage of five SRTM images, multiple regression analysis of annual mean pluviometric data obtained from DAEE's pluviometric stations and, krigage with external derivation from the multiple regression analysis output data.

All maps, figures and GOD model input data were developed, designed and analyzed using specific software for Geographic Information System integration, better known as GIS.

SIGLAS E ABREVIACÕES

ASTM: *American Society for Testing and Materials*

CBH: Comitê das Bacias Hidrográficas

CETESB: Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental

COSV: Compostos Orgânicos Semi-Voláteis

COV: Compostos Orgânicos Voláteis

CPRM: Serviço Geológico do Brasil

DAEE: Departamento de Águas e Energia Elétrica

FIESP: Federação das Indústrias do Estado de São Paulo

IAP: Índice das Águas para Fins de Abastecimento Público

IG: Instituto Geológico

IPT: Instituto de Pesquisa e Tecnologia

IQR: Índice de Qualidade de Resíduos

IVA: Índice das Águas para Proteção da Vida Aquática

GOD: *Groundwater Confinement, Overlay Strata and Depth to Groundwater*

PCJ: Piracicaba, Capivari e Jundiaí

SEADE: Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados

SIG: Sistema de Informação Geográfica

SRTM: *Shuttle Radar Topography Mission*

UGRHI: Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo

USEPA: United States Environmental Protection Agency

ÍNDICE

| | |
|--|-----|
| AGRADECIMENTOS..... | i |
| RESUMO | ii |
| ABSTRACT | iii |
| SIGLAS E ABREVIACÕES | iv |
| LISTA DE TABELAS..... | vii |
| LISTA DE QUADROS | vii |
| LISTA DE FIGURAS | vii |
| LISTA DE MAPAS | vii |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2. OBJETIVOS | 3 |
| 3. METODOLOGIA..... | 3 |
| 4. UGRHI-PCJ | 6 |
| 5. GEOLOGIA | 7 |
| 5.1. EMBASAMENTO CRISTALINO | 7 |
| 5.2. GRUPO SÃO ROQUE | 8 |
| 5.3. GRUPO TUBARÃO (Formação Itararé) | 9 |
| 5.4. GRUPO GUATÁ (Formação Tatuí)..... | 9 |
| 5.5. GRUPO PASSA DOIS..... | 10 |
| 5.6. GRUPO SÃO BENTO | 11 |
| 5.7. FORMAÇÃO SERRA GERAL | 12 |
| 5.8. FORMAÇÃO ITAQUERI..... | 13 |
| 5.9. FORMAÇÃO RIO CLARO..... | 14 |
| 5.10. DEPÓSITO CENOZÓICOS | 14 |
| 6. HIDROGEOLOGIA..... | 15 |
| 6.1. AQÜÍFERO PRÉ CAMBRIANO..... | 15 |
| 6.2. AQÜÍFERO TUBARÃO | 16 |
| 6.3. AQÜÍFERO GUARANI..... | 17 |
| 6.4. AQÜÍFERO BAURU | 17 |
| 6.5. AQÜÍFERO SERRA GERAL | 18 |
| 6.6. AQÜÍFERO DIABÁSIO | 18 |
| 6.7. AQÜICLUDE PASSA DOIS..... | 18 |
| 7. USO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA E SUPERFICIAL | 19 |
| 8. RESÍDUOS URBANOS | 20 |
| 9. ATIVIDADES INDUSTRIAIS | 23 |
| 10. VULNERABILIDADE DE AQÜÍFEROS | 27 |
| 10.1. APLICAÇÃO | 30 |
| 10.2. MODELO GOD | 32 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 11. | CONCEITOS DE HIDROGEOLOGIA APLICADOS AO ESTUDO DE VULNERABILIDADE DE AQUÍFEROS | 34 |
| 11.1. | ZONA VADOSA | 34 |
| 11.2. | TRANSPORTE | 39 |
| 11.3. | RECARGA HIDRÁULICA | 40 |
| 12. | CARGAS POLUIDORAS E RISCO DE POLUIÇÃO | 42 |
| 12.1. | RESÍDUOS URBANOS..... | 44 |
| 12.1.1. | Saneamento Básico..... | 44 |
| 12.2. | REGIÕES AGRÍCOLAS | 46 |
| 12.3. | ATIVIDADES INDUSTRIAIS | 47 |
| 13. | SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA | 49 |
| 14. | GEOESTATÍSTICA | 50 |
| 14.1. | KRIGAGEM RESIDUAL | 50 |
| 14.1.1. | Imagem SRTM..... | 52 |
| 14.2. | ANÁLISE DE REGRESSÃO MÚLTIPLA | 53 |
| 14.3. | Krigagem com Deriva Externa (KDE)..... | 54 |
| 15. | MAPA DE VULNERABILIDADE..... | 55 |
| 15.1.1. | Cruzamento de Mapas..... | 57 |
| 15.1.2. | Interpretação | 57 |
| 16. | PROPOSTA DO MODELO GODP | 58 |
| 16.1. | APLICAÇÃO GEOESTATÍSTICA..... | 60 |
| 16.1.1. | Mapa Topográfico por Krigagem Residual | 60 |
| 16.1.2. | Mapa Pluviométrico por Análise de Regressão Múltipla | 62 |
| 16.2. | MAPA DE VULNERABILIDADE - GODP | 68 |
| 16.2.1. | Comparação entre os três testes do modelo GODP e o modelo GOD | 68 |
| 17. | CONCLUSÃO | 69 |

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1:** Litologias representantes do embasamento cristalino e respectivas nomenclaturas
Tabela 2: Enquadramento dos Municípios da UGRHI PCJ, quanto às condições de tratamento e disposição de resíduos domiciliares – IQR
Tabela 3: Distribuição das indústrias de alimentos, bebidas, curtume, madeira, papel e celulose, gráfica e refino de petróleo por Município
Tabela 4: Distribuição das indústrias química, borracha, plásticos, metalurgia, médico hospitalar e automotiva, por Município
Tabela 5: Principais produtos e poluentes por ramos de atividades industriais localizados na UGRHI-PCJ
Tabela 6: Índice de vulnerabilidade adotado por tipo de confinamento da água subterrânea e profundidade da água subterrânea.
Tabela 7: Índice de vulnerabilidade adotado para zona vadosa
Tabela 8: Índices testados para a elaboração do GODP
Tabela 9: Parâmetros variográficos ajustados para cada imagem SRTM
Tabela 10: Dados de entrada da análise de regressão múltipla
Tabela 11: Resíduos da análise de regressão do i.p.m.a..

LISTA DE QUADROS

- Quadro 1:** Quantidade de Municípios de acordo com o tipo de uso da água
Quadro 2: Volume de água utilizada por mês por tipo de captação
Quadro 3: Enfoque e aplicação dos diferentes níveis de avaliação de risco de contaminação da água subterrânea
Quadro 4: Classes de vulnerabilidade de poluição de aquíferos
Quadro 5: Relações entre zona vadosa e zona saturada

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1:** Fluxograma da pesquisa
Figura 2: Figura de localização da UGRHI-PCJ
Figura 3: Qualidade das águas superficiais da UGRHI-PCJ segundo os índices de Águas para Fins de Abastecimento Público (IAP) e para as Águas para Proteção da Vida Aquática (IVA)
Figura 4: Desvio padrão do IQR de 1997 a 2005, com relação à produção diária de lixo doméstico de cada Município pertencente a UGRHI-PCJ.
Figura 5: Sistema de avaliação do índice de vulnerabilidade natural de aquíferos
Figura 6: Figura representativa dos índices adotados para os parâmetros do modelo GOD
Figura 7: Figura ilustrativa da topografia da UGRHI-PCJ e variogramas experimentais utilizados para na krigagem residual de cada imagem SRTM
Figura 8: Figura da distribuição geográfica e estatística do i.p.m.a, altitude e log da inclinação
Figura 9: Variograma experimental do i.p.m.a.
Figura 10: Isoietas do índice pluviométrico médio anual da UGRHI-PCJ
Figura 11: Testes para aferição do Modelo GODP

LISTA DE MAPAS

- Mapa 1:** Mapa Geológico da UGRHI-PCJ
Mapa 2: Mapa dos Aquíferos da UGRHI-PCJ
Mapa 3: Mapa de Vulnerabilidade das Águas Subterrâneas da UGRHI-PCJ Utilizando Modelo GOD

1. INTRODUÇÃO

A explosão demográfica e científica atuante desde o final do século 19 proporcionou mudanças muito profundas nas estruturas e infra-estruturas da sociedade. Algumas destas importantes mudanças tiveram uma contribuição para uma melhoria aguda da mesma como qualidade e aumento da expectativa de vida. Contudo, outras causaram e causam impactos negativos significativos para a humanidade e o meio ambiente.

Pode-se resumir em três os fatores de caráter sócio-ambiental que possuem maior foco de debate em uma escala global:

- a contínua e agressiva degradação do meio ambiente, gerando a perda sumária da biodiversidade e ciclos evolutivos;
- emissão de gases que contribuem para o aumento do efeito estufa e a conseqüente destruição da camada de ozônio e aumento da temperatura global;
- a crescente quantidade de áreas em que ocorre contaminação das águas subterrâneas, ocasionando uma série de problemas à ecologia, abastecimento público e saúde humana.

Referente ao abastecimento público, diversos estudos vêm sendo conduzidos no Brasil e no mundo, atribuindo à contaminação da água subterrânea, um importante nicho econômico-científico a ser desenvolvido e explorado.

Atualmente existe uma gama de serviços e produtos oferecidos ao mercado com um enfoque no controle e remediação das áreas contaminadas, contudo, quando o quesito é a preservação e a identificação de potenciais riscos, o interesse comercial é diminuto e, as linhas de pesquisa restritas às universidades e institutos de pesquisa.

Entretanto, a preservação dos aquíferos é essencial para a continuidade de nossa sociedade, constituindo uma reserva estratégica e vital para o abastecimento público. Segundo Foster (1988), são seis os tópicos que devem receber atenção especial quanto à preservação dos aquíferos:

- o aumento e a diversificação de produtos químicos, potencialmente poluidores da água subterrânea;
- o lançamento *in natura* de esgotos e efluentes industriais em larga escala;
- o grande aumento de aplicações de fertilizantes e pesticidas na agricultura;
- os efeitos potencialmente nocivos à saúde, causados por baixas concentrações de certos poluidores persistentes de toxicologia pouco conhecida;

- a dificuldade e a impraticabilidade de se promover a remoção de poluentes em um grande número de fontes pontuais de captação (poços);
- o fato de que a reabilitação de um aquífero poluído requer custos muito elevados a ponto de, muitas vezes, implicar o simples abandono da área de captação.

Um dos fatores de preocupação ambiental eminente é de que por muitas décadas o solo foi considerado um receptor ilimitado dos subprodutos e materiais descartáveis, como lixos domésticos, resíduos sólidos industriais e efluentes, a partir de uma pressuposição equivocada de que este meio possuía uma capacidade infinita para atenuação das substâncias nocivas, levando ao possível saneamento dos compostos “absorvidos”.

Dessa forma, ainda há poucos anos, a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB definiu uma área contaminada como *“um local onde comprovadamente há poluição ou contaminação em decorrência de substâncias ou resíduos sólidos nela depositados, acumulados, armazenados, enterrados ou infiltrados, de forma planejada ou acidental”*.

Embora as águas subterrâneas sejam naturalmente mais protegidas dos agentes contaminantes do que as superficiais, a atual expansão das atividades industriais e comerciais tem acarretado a poluição dos sistemas de aquíferos em muitos locais de abastecimento urbano e agrícola, portanto, hoje em dia, existe uma constante preocupação quanto à caracterização e controle da qualidade da água subterrânea.

A Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos Piracicaba, Capivari, Jundiá (“UGRHI-PCJ”) que compreende as bacias hidrográficas dos Rios Capivari, Jundiá e Piracicaba, esta última com contribuições dos Rios Corumbataí, Jaguari, Camanducaia e Atibaia, foi selecionada neste estudo como área “piloto” para a estimativa da vulnerabilidade de seus aquíferos.

No desenvolvimento dessa Dissertação foram utilizadas duas ferramentas para o processamento e interpretação de variáveis ambientais relacionadas à UGRHI-PCJ:

- ***Sistemas de Informação Geográfica (SIG)***

A aplicação de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e geoprocessamento é fundamental para a visualização e locação da pesquisa e elaboração de mapas temáticos visualmente adequados e tecnicamente corretos. Sua aplicação foi voltada

para o georreferenciamento, vetorização, modelagem, interpretação e apresentação de algumas figuras e dos mapas apresentados nessa dissertação.

- ***Geoestatística***

Aplicações geoestatísticas para a interpretação de variáveis ambientais direcionadas à distribuição estatística dos dados espaciais, incluindo sua correlação e variância, possibilita a interpolação espacial dos valores de interesse e estimativa probabilística das regiões próximas não amostradas. Torna-se, assim, uma ferramenta essencial na estimativa de variáveis aleatórias georreferenciadas, sendo que neste trabalho foi aplicada para a elaboração de um mapa pluviométrico e outro topográfico.

2. OBJETIVOS

O objetivo principal dessa dissertação é a aplicação de um modelo específico, nacional e internacionalmente aceito utilizado para a estimativa da vulnerabilidade dos aquíferos contidos na UGRHI-PCJ. Para isso, foram abordados conceitos hidrogeológicos e ambientais, assim como a contextualização e regionalização da área de estudo.

Em paralelo, teve como objetivo teórico e prático a aplicação de conceitos geoestatísticos, como krigagem residual e análise de regressão múltipla, e o uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para o cruzamento de informações regionalizadas, a elaboração de mapas temáticos, análise e apresentação gráfica. Assim como a aplicação de ferramentas geoestatística para a interpolação de variáveis aleatórias georreferenciadas.

Por fim, tentou-se propor uma adequação do modelo adotado para a estimativa de vulnerabilidade de aquíferos, no que tange o mapeamento em escala reduzida (<1:250.000). Neste sentido, foi inserido um quarto parâmetro (pluviometria) ao modelo adotado e seu resultado comparado ao modelo original.

3. METODOLOGIA

O roteiro metodológico adotado para o desenvolvimento desta pesquisa abordou os seguintes tópicos:

- contextualização regional da UGRHI-PCJ com a caracterização geológica, hidrogeológica, uso e ocupação do solo e, a apreciação da atual situação do uso das águas subterrâneas e descarte de resíduos;
- levantamento e seleção das principais atividades industriais instaladas dentro dos municípios integrantes da UGRHI-PCJ, estendendo a correlação entre os ramos industriais selecionados e seus principais produtos e resíduos contaminantes e, complementarmente, os contaminantes de origem urbana e rural;
- pesquisa e compreensão sobre as características hidrogeológicas relacionadas à zona vadosa, transporte de poluentes e recarga de aquíferos na UGRHI-PCJ;
- pesquisa bibliográfica para compreensão, crítica e a correta aplicação do modelo adotado para a estimativa da vulnerabilidade de aquíferos;
- aplicação de métodos geoestatísticos para elaboração de mapas topográfico e pluviométrico, utilizando krigagem residual, análise de regressão múltipla e krigagem por deriva externa;
- utilização de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para a elaboração de mapas temáticos que incluiu a análise espacial dos dados, captura e conversão de imagens, vetorização de linha, pontos e polígonos, álgebra de mapas, descrição dos resultados e apresentação final;
- proposta da inserção do índice pluviométrico ao modelo GOD para estimativa de vulnerabilidade em escala regional;
- comparação de resultados entre os mapas elaborados.

A **Figura 1**, apresenta o fluxograma da pesquisa realizada para a idealização desta dissertação.

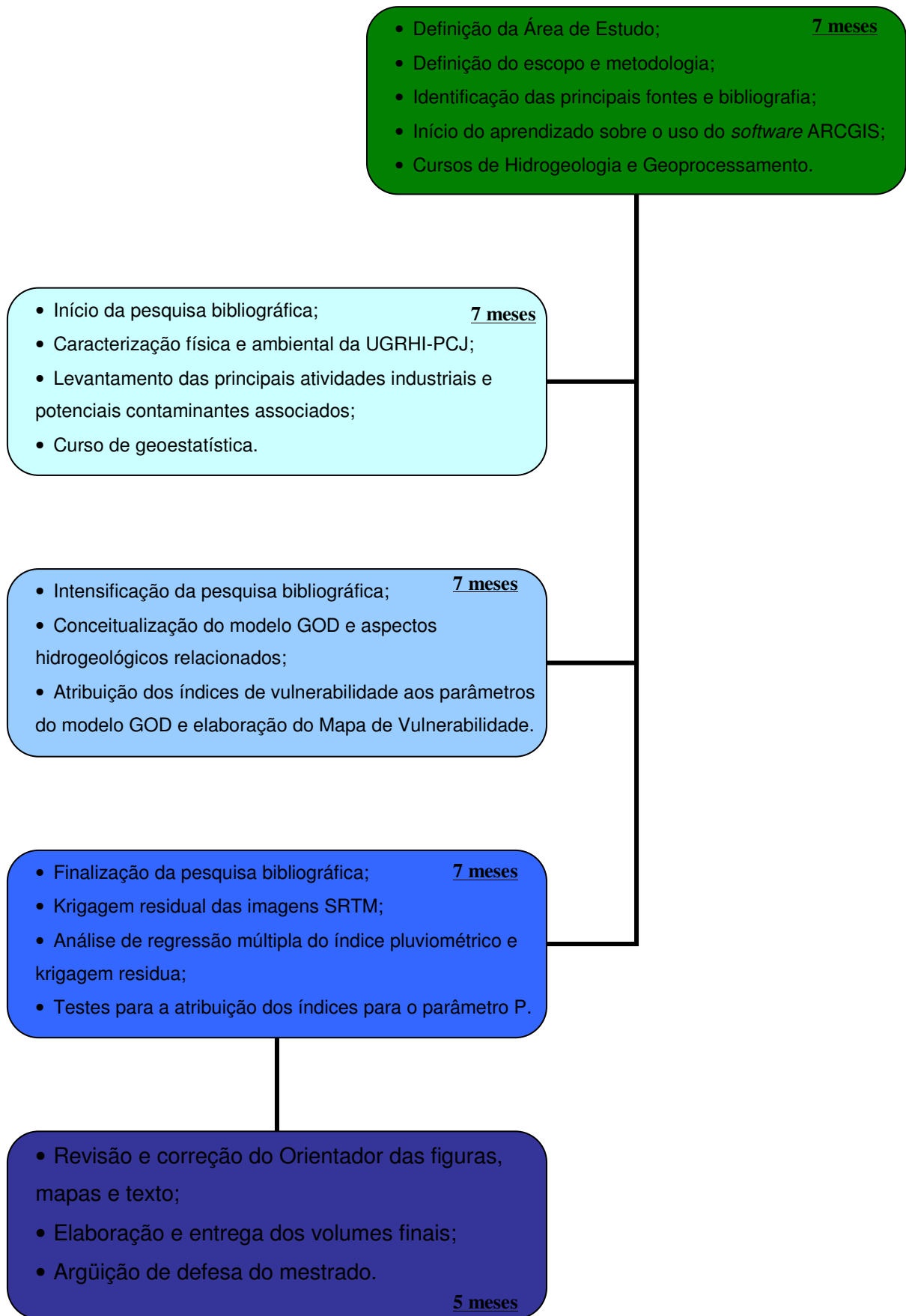


Figura 1: Fluxograma da pesquisa

4. UGRHI-PCJ

A Unidade de Gerenciamento dos Recursos Hídricos das bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (UGRHI-PCJ), localizada na porção centro-leste do Estado de São Paulo, tem uma área aproximada de 14.040 km², equivalente a 92% da área total das bacias hidrográficas que a compõem, pois, os outros 8% das bacias pertencem a municípios mineiros (COPLAENGE, 2003), e não foram incluídos neste estudo.

A porção paulista da UGRHI-PCJ compreende 58 municípios com suas sedes localizadas dentro dos limites da UGRHI, reunindo uma população total no ano 2000 de cerca de 4.303.000 habitantes, caracterizando-se como a segunda UGRHI mais populosa do Estado de São Paulo. Nos municípios de Campinas, Piracicaba, Jundiaí, Limeira, Sumaré, Americana, Santa Bárbara D'Oeste, Rio Claro, Hortolândia e Indaiatuba encontram-se 65,4% dessa população.

A intensa urbanização que ocorre na região desde a década de 1970, decorrente da migração entre metrópole e interior e o êxodo rural, faz com que 94% da população viva em centros urbanos, com uma densidade demográfica de 301 hab./km² (IRRIGART, 2005 e JMR, 2006).

A UGRHI - PCJ é constituída por três bacias homônimas (Bacias Piracicaba, Capivari e Jundiaí), cujos principais cursos de água são afluentes da margem direita do Tietê Médio Superior. A Bacia Piracicaba é subdividida nas sub-bacias Piracicaba, Corumbataí, Camanducaia, Jaguarí e Atibaia.

A **Figura 2** apresenta o mapa de localização da UGRHI-PCJ e a distribuição das bacias e sub-bacias hidrográficas, assim como as UGRHIs adjacentes.

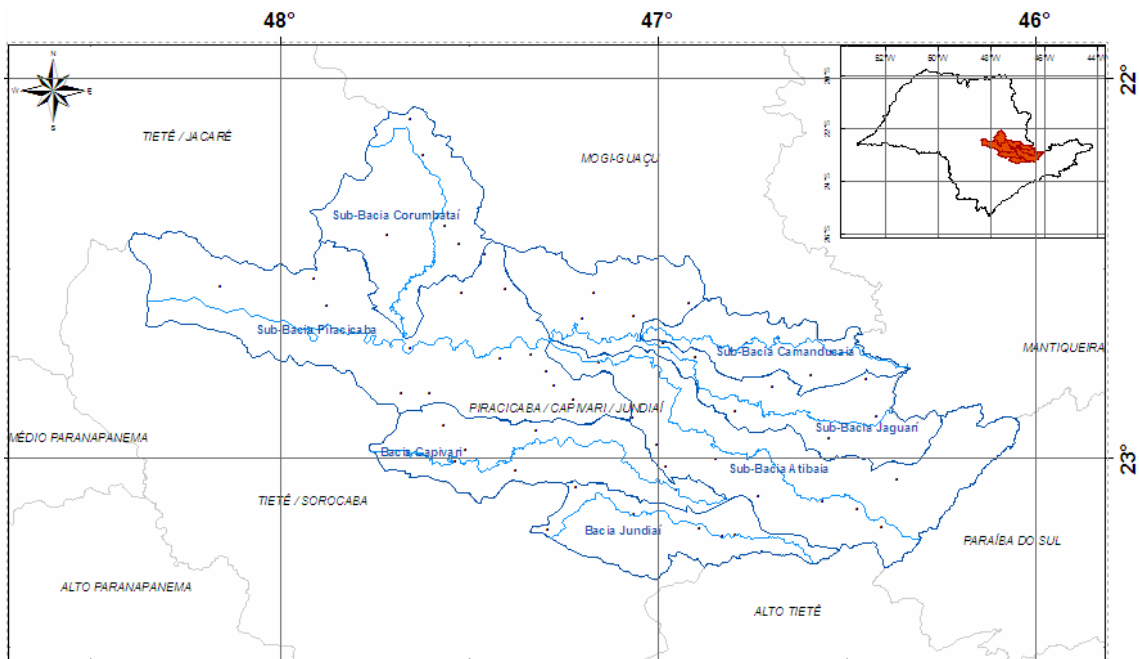


Figura 2: Figura de localização da UGRHI-PCJ

5. GEOLOGIA

As informações referentes à geologia regional da UGRHI-PCJ foram compiladas da Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, folhas Paranapanema SF-22 e Rio de Janeiro SF-23 (DNPM, 1978 e 1979), servindo como suporte às classificações, nomes, idades e descrições das unidades litoestratigráficas descritos em seus respectivos arquivos digitais (CPRM, 2004), digitalizados, vetorizados, georreferenciados e seu banco de dados utilizado para suporte das informações. Foram também compiladas informações de IG, CETESB e DAEE (1997), IRRIGART (2005) e (COPLAENGE, 2003) e outros referenciados no texto.

O enfoque sobre a geologia regional da UGRHI-PCJ limita-se à classificação litológica representada pelos polígonos existentes nos arquivos digitais das cartas ao Milionésimo supras citada. O mapa geológico está apresentado no Anexo A - Mapa 1.

5.1. EMBASAMENTO CRISTALINO

O embasamento cristalino é composto por rochas ígneas e metamórficas de idade proterozóica, correspondente a aproximadamente 48% da área de estudo. Diversas atividades tectônicas forneceram o arcabouço estrutural em que estão inseridas essas rochas. Os principais litotipos encontrados são granitos e granitóides em geral,

contudo charnokitos, migmatitos, meta quartzitos e gnaisses ocorrem com maior frequência.

Devido à grande extensão em área em que ocorrem os litotipos pertencentes ao embasamento, assim como os diversos Complexos, Corpos, Grupos e Suítes, seu detalhamento não será apresentado nesse estudo. A Tabela 1 apresenta o consolidado das rochas pertencentes ao embasamento cristalino da UGRHI-PCJ, incluindo as nomenclaturas adotadas, presentes no mapa geológico ao milionésimo utilizado nesse estudo.

Tabela 1: Litologias representantes do embasamento cristalino e respectivas nomenclaturas

| NOMENCLATURA | LITOLOGIA |
|--|---|
| Complexo Amparo | migmatitos tonalito, trondhjemitos e ortognaisses |
| Complexo Granítico Morungaba | monzogranito, quartzo-diorito, quartzo-monodiorito, quartzo-monzonito, biotita monzogranito; granodiorito, monzogranito, sienogranito e leucomonzogranito |
| Complexo Granítico Socorro - Suíte Bragança Paulista | granodiorito, monzonito e sienito |
| Complexo Itu | granito, monzogranito e sienogranito |
| Complexo Socorro Guaxupé | charnockito, enderbitos, granito, jotunitos, mangeritos, monzogranito e quartzo-sienito |
| Complexo Vargina-Guaxupé | anatexito, gnaisses, migmatito estromatolítico, gnaisses e tonalítico |
| Corpo Granítico Nazaré Paulista | biotita granito |
| Corpo Granito Atibaia | granito e sienogranito |
| Corpo Granito Gussuroca | quartzo-sienito e biotita granito |
| Corpo Granito Jundiuvira | biotita granito |
| Corpo Granito Mariporã | granodiorito, monodiorito e monzogranito |
| Corpo Granito Pedra Branca | granodiorito, biotita granito |
| Corpo Granito Pica-Pau | sienogranito |
| Corpo Granito Quatro Cantos | biotita granito |
| Corpo Granito Serra do Lobo | granodiorito, monzogranito, quartzo-sienito, sienogranito, biotita monzogranito e biotita sienogranito |
| Corpo Granito Serra Preta | biotita Granito |
| Corpo Granito Sorocaba | granito, granodiorito, monzogranito e sienogranito |
| Corpo Granitóide Serra do Barro Branco | biotita monzogranito |
| Corpo Ortognaisses Serra Negra | tonalito e ortognaisses |
| Granito Gonçalves | biotita granito |
| Grupo Andrelândia | metagrauvaca, muscovita-biotita gnaisses, quartzo-metarenito, quartzito e muscovita quartzito |
| Grupo Granitóide Cachoeira | monzogranito, monzonito, sienomonzogranito |
| Suíte Granitóide Piracaia | monodiorito, monzonito e sienito |

5.2. GRUPO SÃO ROQUE

As rochas do Grupo São Roque são representadas principalmente por uma associação vulcano-sedimentar com diferentes graus metamórficos. Nos seus limites norte e sul faz contato tectônico com o complexo cristalino, estando associados a

anfíbolitos e rochas granitóides intrusivas. Dentro da UGRHI-PCJ é representada pelas Formação Boturuna, Formação Estrada dos Romeiros e Formação Piragibu.

Foram identificadas rochas vulcânicas em diques e soleiras correspondentes a intrusões de rocha ígnea básica. No complexo, os anfíbolitos, contrastam texturalmente com as ocorrências do grupo São Roque, indicando um grau metamórfico mais elevado (Coutinho, 1972).

A Formação Estrada dos Romeiros, definida por Bergmann (1988), em contato transicional com a unidade carbonática da Formação Pirapora do Bom Jesus, comporta na base um membro arenítico, com metarenitos, ritmitos gradados microconglomeráticos e intercalações subordinadas de metapelitos. O membro pelítico superior é constituído por metarritmitos síltico-argilosos com níveis de metarenitos quartzosos. A passagem do membro arenítico para o membro pelítico é gradacional com a predominância dos termos pelíticos no topo do membro arenoso. Na base do membro pelítico predominam ardósias e filitos laminados com intercalações de ritmitos gradados, microconglomeráticos e metarenitos médios a finos.

O ambiente de deposição do Grupo São Roque corresponde a um mar raso, em uma bacia de retro-arco, onde estariam representadas desde fácies deltaicas proximais até turbiditos de águas mais profundas, com atividade vulcânica subaquosa restrita. Todas as litologias são pouco deformadas, com dobras de vergência para noroeste, que se apresentam mais estiradas próximas às zonas de cisalhamento (BERGMANN, 1988).

5.3. GRUPO TUBARÃO (Formação Itararé)

A Formação Itararé é a formação basal do Grupo Tubarão, única representante desse grupo dentro da UGRHI-PCJ. Possui sua litologia representada por arenitos mal selecionados indo de finos a muito grossos, com estratificação cruzada acanalada a plano-paralela, diamictitos, folhelhos, ritmitos, conglomerados e raras camadas de carvão. Sua origem se deu em um ambiente glacial com ingressões marinhas, ocorrido entre o Carbonífero Superior e o Permiano.

5.4. GRUPO GUATÁ (Formação Tatuí)

Representado pela Formação Tatuí corresponde no Estado de São Paulo ao mesmo intervalo deposicional das formações Rio Bonito e Palermo mapeadas em Santa Catarina e no Paraná, com discreta variação regional de fácies.

Conforme Aboarrage e Lopes (1986), é formada por siltitos e siltitos arenosos, cor cinza, freqüente matriz carbonosa, ocasionais fragmentos e níveis de carvão, nódulos de pirita, laminação irregular ou maciço. Níveis de arenito cinza-esverdeado, médio a grosseiro, imaturo. Na porção superior é comum ocorrerem camadas de arenito fino, quartzoso, às vezes com estruturas lenticulares. Seu contato inferior com o Grupo Itararé é através de discordância, podendo ocorrer camada de conglomerado basal, e o contato superior, com o Membro Taquaral da Formação Irati, se faz através de superfície erosiva. O conteúdo fossilífero se resume a moldes de conchas, fragmentos de dentes e ossos, espículas de esponjas e restos indeterminados de plantas. O principal recurso mineral associado a esta unidade é a argila.

5.5. GRUPO PASSA DOIS

O Grupo Passa Dois, formado durante o Permiano tem sua distribuição cronoestratigráfica decrescente representada pelas Formação Corumbataí, Rio do Rasto, Teresina, Serra Alta e Irati, sendo que, dentro da UGRHI PCJ somente a Formação Rio do Rasto não está presente.

Segundo Mezzalira *et al.* (1981) a Formação Corumbataí é composta na sua seção inferior, por um pacote de argilitos, folhelhos e siltitos cinza-escuros e pretos, com fraturas conchoidais e concreções calcíferas, e ainda um conjunto de argilitos e folhelhos cinza-escuros, de aspecto rítmico, com ocasionais leitos de calcário silicificados, oolíticos em parte, além de níveis coquinóides. Na seção superior ocorre uma seqüência de argilitos e arenitos finos, argilosos, regular a bem classificados, esverdeados, arroxeados e avermelhados. Calcários e camadas de argilas são os recursos minerais desta unidade, podendo assumir importância regional, como o pólo cerâmico de Rio Claro – Sta. Gertrudes – Cordeirópolis localizado no Estado de São Paulo.

A Formação Teresina juntamente com a Formação Serra Alta são base da formação, e compõem a porção basal do Grupo Passa Dois; foram atribuídas idades Kazaniana e estão na fase regressiva da Superseqüência Gondwana I. A Formação Teresina é constituída por argilitos, siltitos e arenitos muito finos e finos, cinza escuros a esverdeados, com geometria tabular ou lenticular muito estendida. A sedimentação distribui-se em ciclos granocrescentes (parasseqüências) que iniciam com pelitos maciços ou laminados, passando, em sentido superior, para siltitos com acamadamento *wavy* e *linsen*. Na porção mais superior da unidade, as parasseqüências podem terminar ou serem inteiramente constituídas por arenitos com

estratificação cruzada *hummocky*, acamadamento *flaser* e *drape*, marcas onduladas simétricas e laminação cruzada cavalgante. Em alguns locais, especialmente no Rio Grande do Sul e Paraná, pode apresentar pacotes de arenitos com estratificação cruzada *hummocky* amalgamados, com até 10 m de espessura, indicando deposição em ambiente influenciado por ondas de tempestade. Camadas de calcário e de argilas constituem o potencial mineral desta unidade.

A Formação Irati consiste em folhelhos e argilitos cinza escuros, folhelhos betuminosos e calcários associados, portadores de répteis mesossaurídeos. Na base, predominam os folhelhos, argilitos e siltitos cinza escuros, não betuminosos, maciços ou com laminação plano-paralela, formando camadas tabulares (Membro Taquaral). Na parte superior ocorre uma característica associação de folhelhos, folhelhos betuminosos e calcários (Membro Assistência). Nos calcários podem ocorrer estratificações cruzadas *hummocky*, marcas onduladas simétricas e assimétricas e laminações cruzadas cavalgantes. Os sedimentos finos indicam deposição por decantação em ambiente de águas calmas, abaixo do nível de ação das ondas. Os folhelhos betuminosos sugerem a existência de períodos de estratificação da coluna de água. Ocorrências de cobre são encontradas junto a diques e *sills* básicos da Formação Serra Geral que afetam a Formação Irati (SCHNEIDER, 1974).

5.6. GRUPO SÃO BENTO

Representado dentro da UGRHI-PCJ pelas Formação Botucatu no topo e Formação Pirambóia na base, o Grupo São Bento é composto por rochas sedimentares depositadas entre o Permiano e o Triássico.

A Formação Botucatu é um depósito clástico sedimentar originado em um ambiente desértico, a partir da deposição de dunas eólicas formadas entre o Triássico e o Cretáceo. Ela é composta essencialmente por arenitos finos a grossos, de coloração avermelhada, foscas, bem arredondados e com alta esfericidade, dispostos em sets e/ou *closets* de estratificações cruzadas, planar ou acanaladas, de médio a grande porte. Os estratos cruzados são compostos na sua porção mais íngreme por lâminas alternadas de fluxo e queda livre de grãos que se interdigitam em direção à base com laminações transladantes cavalgantes. Apresentam alternância de lâminas de arenitos finos e médios, resultando numa bimodalidade textural característica. Têm sido interpretados como depósitos residuais de dunas eólicas crescentes e lineares acumuladas em extenso mar de areia. A ausência de depósitos de interdunas úmidos permite interpretar a Formação Botucatu como um sistema eólico seco (SCHERER,

1998). Em regiões adjacentes a soleiras e diques de intrusão basáltica, sua litologia encontra-se dura e vitrificada.

A Formação Pirambóia tem sua área tipo situada nos arredores de Pirambóia, Estado de São Paulo. O contato com as unidades inferiores seria discordante (ALMEIDA e MELO, 1981), porém é observada gradação entre as duas unidades. Constituída, em essência, por arenitos médios e finos com cores esbranquiçadas, avermelhadas e alaranjadas, com geometria lenticular bem desenvolvida. Estratificações cruzadas acanaladas de porte grande e muito grande, e laminações cruzadas transladantes subcríticas são as estruturas primárias mais freqüentes. É fonte de areias quartzosas para uso industrial e suas camadas de arenitos são parte constituinte do Aqüífero Guarani.

5.7. FORMAÇÃO SERRA GERAL

A Formação Serra Geral constitui expressivo registro de vulcanismo básico que recobriu extensivamente rochas sedimentares paleozóicas e mesozóicas da Bacia do Paraná. Segundo Almeida (1986), a espessura média dos derrames da Formação Serra Geral é de cerca de 650 metros. Além da extensa área de derrames, devem ser também destacadas as inúmeras ocorrências de rochas intrusivas ligadas ao mesmo evento magmático.

Constitui, em conjunto com a Formação Botucatu (J3K1bt), a denominada Bacia Serra Geral, correspondendo à Superseqüência Gondwana III, segundo a concepção de Milani (1997). Resultante de intenso magmatismo fissural, representado na forma de uma espessa cobertura de lavas, com cerca de 1.500 metros de espessura junto ao depocentro da bacia, associado a uma extensa rede de diques e múltiplos níveis de soleiras intrudidos na pilha sedimentar.

Os derrames assentam-se sobre os arenitos eólicos da Formação Botucatu, com inclinações subhorizontais de até 5° em direção ao centro da bacia. São constituídos principalmente por basaltos toleíticos e andesi-basaltos toleíticos, com augita e pigeonita, perfazendo aproximadamente 90% do volume total das rochas extrusivas. Subordinadamente ocorrem andesitos toleíticos, riocitos e riolitos (MARQUES e ERNESTO, 2004).

As rochas basálticas são compostas por fenocristais de augita, plagioclásio, pigeonita, alguma titanomagnetita e rara olivina, em matriz composta por estes mesmos minerais. As rochas intermediárias contém fenocristais de augita, plagioclásio,

pigeonita e titanomagnetita em matriz de plagioclásio, augita, pigeonita, titanomagnetita, ilmenita e quartzo. As rochas ácidas apresentam fenocristais de plagioclásio, que podem perfazer até 30% do volume da rocha, além de outros de augita, pigeonita e titanomagnetita em matriz de quartzo, feldspato alcalino, plagioclásio, piroxênios, titanomagnetita e ilmenita (MELFI e PICCIRILLO, 1998).

As rochas da Formação Serra Geral são portadoras de ocorrências de cobre e ouro, mas sua principal mineralização consiste em ágatas e ametistas. Lajes, brutas ou regulares, são de amplo uso como piso de alta durabilidade e no revestimento de edificações, além de ser fonte primordial de brita para a construção civil.

As soleiras ocorrem intrudidas nos sedimentos paleozóicos, especialmente nas formações Irati e Itararé, com espessuras que variam, normalmente, de 2 a 200 metros, tendo sido descritas seções de até 1.000 metros. Esta unidade é basicamente composta pelos equivalentes intrusivos das rochas vulcânicas, sendo representada geralmente por soleiras e diques de diabásio, podendo ocorrer, em algumas localidades, dioritos e microdioritos pórfiros, lamprófiros, andesitos, monzonitos pórfiros e traquiandesitos (MARQUES e ERNESTO, 2004).

O metamorfismo de contato gerado pela intrusão dos *sills* de rochas básicas resulta, localmente, no aumento do *rank* de carvões e em ocorrências localizadas de cobre nas formações Irati e Corumbataí.

5.8. FORMAÇÃO ITAQUERI

A Formação Itaquerí é correlata às rochas pertencentes ao Grupo Bauru, com sua deposição ocorrida durante o Cretáceo estendendo-se ao início do Paleógeno. Formada principalmente por arenitos e arenitos conglomeráticos. Está localizada dentro da UGRHI-PCJ em uma estreita faixa localizada na porção noroeste da sub-bacia Corumbataí.

Ponçano (1981), descreve esta unidade como constituída por intercalações de arenitos, folhelhos e conglomerados. Os arenitos, têm granulometria variável, de muito fina e siltítica até grossa, são eventualmente silicificados; podendo ser arcoseanos, com grande variedade mineralógica. A matriz é argilosa e em pequena quantidade, o cimento é calcedônia, incluindo ainda óxido de ferro. Os conglomerados, com espessuras de até 5 metros, compõem-se de clastos bem classificados, com até 30 centímetros de diâmetro; compostos principalmente por basalto, tendo ainda quartzo, calcedônia, granito, quartzito, argilito, filito, pegmatito, sílex e folhelhos. As estruturas

sedimentares, eventualmente caracterizadas por uma a estratificação plano-paralela ou cruzada nos arenitos; disposição caótica dos clastos nos conglomerados e estratificação de corrente nos mais finos.

Argilas e argilas para refratários são os principais recursos minerais encontrados, sendo ainda referenciada a ocorrência de diamantes em depósitos aluvionares de rios que drenam esta unidade.

5.9. FORMAÇÃO RIO CLARO

A Formação Rio Claro é constituída, por arenitos, arenitos conglomeráticos, arenitos argilosos e argilitos intercalados, que foram separados por Melo (1995), em quatro fácies, a saber: depósitos de lamitos com clastos centimétricos imaturos e laminação ausente ou incipiente; depósitos de cascalhos associados com areias com estratificação acanalada ou tabular; depósitos de areia com estratificação plano-paralela e cruzada acanalada e com intercalações de argila e, finalmente, depósitos argilosos a silto-argilosos, com laminação distinta a indistinta e conteúdo fossilífero com representantes de sistema fluvial meandrante em clima úmido.

Os depósitos da Formação Rio Claro são explorados localmente para obtenção de cascalho e areia para construção civil, areia para moldes de fundição e argila para a indústria cerâmica.

5.10. DEPÓSITO CENOZÓICOS

Ocorrem com menor expressão, dentro da área de estudo, depósitos sedimentares originados durante o cenozóico, que acarretam principalmente na cobertura das rochas do embasamento cristalino, assim como das margens de inundação e várzea dos rios.

São três os tipos principais de depósitos sedimentares cenozóicos (exceto Formação Rio Claro) encontrados na região de estudo:

- depósitos Aluvionares: constituem depósitos nas margens, fundos de canal e planícies de inundação de rios; as areias, cascalheiras, siltes, argilas e, localmente turfas, resultantes dos processos de erosão, transporte e deposição a partir de áreas-fonte diversas, desenvolvendo-se sobre a Província Paraná e estendendo-se para as províncias limítrofes.

- depósitos Detrito-Lateríticos: associados principalmente à formação Botucatu, caracterizando uma fase de retrabalhamento de sedimentos de natureza arenosa, durante o Pleistoceno. Constitui-se de areias finas a grossas, localmente siltico-argilosas e mais raramente conglomeráticas, intimamente relacionadas a superfícies de aplainamento, formando terraços argilo-arenosos com cascalhos dispersos e níveis de material transportado e ferruginoso.

- depósitos Coluvio-Eluvionares: compreendem coberturas extensas e delgadas, com ocorrência na Depressão Periférica, *Cuestas* Basálticas e Planalto Ocidental. Tratam-se de coberturas areno-argilosas com no máximo 10 m de espessura, desenvolvidas sobre substrato predominantemente arenoso, sem estruturas sedimentares presentes, embora contenham um nível basal de acumulação de clastos de quartzo. A ocorrência destes depósitos tanto em topos quanto em encostas sugere que resultem da combinação de processos autóctones e alóctones e podem ser compostos por areia, argila e cascalho.

6. HIDROGEOLOGIA

O contexto hidrogeológico em que está inserida a UGRHI-PCJ engloba 5 aquíferos e 1 aquíclode, incluindo aqueles com armazenamento primário (sedimentares) e secundário (fraturados). Os dados apresentados nos sub-capítulos a seguir, referentes às características hidrogeológicas dos aquíferos pertencentes à UGRHI-PCJ, foram compilados de DAEE, IG, IPT e CPRM (2005); IG, CETESB e DAEE (1997) e IRRIGART (2005).

Essas referências foram utilizadas por apresentarem um consolidado das informações necessárias para o desenvolvimento dos mapas de vulnerabilidade, foco da presente pesquisa. O mapa dos aquíferos da UGRHI-PCJ está apresentado no Anexo A - Mapa 2.

6.1. AQÜÍFERO PRÉ CAMBRIANO

O Aquífero Pré-Cambriano ocupa a maior área dentro da UGRHI-PCJ, e é composto por rochas do embasamento cristalino de idade proterozóica. A água circula dentro dos espaços vazios condicionados pela abertura e fechamento de fraturas, geradas por diversos eventos tectônicos.

Quando possui uma camada espessa de solo de alteração de rocha ou manto inconsolidado, a permeabilidade e armazenamento da água podem passar de

secundário (fraturas) para primário (sedimentos). Em alguns pontos esse nível pode atingir 60 metros de espessura.

A existência de regiões com sedimentos sobrejacentes ao aquífero cristalino, por vezes, acarreta no semi-confinamento deste aquífero. Contudo, em um contexto regional, este aquífero será considerado como sendo livre, heterogêneo, descontínuo e anisotrópico com extensão regional.

Possui espessuras diversas, com uma média de 200 metros, estando o nível da água subterrânea entre principalmente 5 e 20 metros de profundidade em sua porção aflorante. A vazão média dos poços varia entre 2 e 7 m³/h podendo chegar a 23 m³/h em regiões com alta densidade de lineamentos e fraturas. Baixa transmissividade com valores entre 0,01 e 0,67 m³/h/m, que varia dependendo da localização e do tipo de estrutura rúptil associada a cada evento tectônico.

A transmissividade deste tipo de aquífero pode variar significativamente de acordo com a disponibilidade hídrica, espessura do aquífero e sistemas de fraturas e contatos. Seus valores podem variar entre 0,1 e 200 m²/dia.

6.2. AQÜÍFERO TUBARÃO

O aquífero Tubarão corresponde ao aquífero sedimentar com maior extensão dentro da UGRHI-PCJ, possui caráter regional, granular, livre a semi-confinado, heterogêneo, descontínuo e anisotrópico. Constituído pelos Grupos Itararé e Guatá (Formação Tatuí). Possui espessuras de até 800 m na parte aflorante no Grupo Itararé e, entre 30 e 50 m na Formação Tatuí.

A capacidade específica ou vazão específica varia ente 0,005 e 4,5 m³/h/m, atingindo localmente mais de 4.000 m³/h/m, e a transmissividade entre 0,3 e 4 m²/dia, com locais chegando a 200 m²/dia. O nível estático médio e a espessura média são de 18 e 134 m respectivamente, com uma baixa porosidade efetiva (5%).

Os picos de transmissividade e vazão podem ser explicados pela contribuição hídrica de fraturas do embasamento cristalino, afetando localmente as características do Aquífero Tubarão.

6.3. AQÜÍFERO GUARANI

O aquífero Guarani ocorre na porção oeste da UGRHI-PCJ, em sua área aflorante ou de recarga, inserida na Depressão Periférica da Bacia do Paraná. Apresenta largura irregular que se amplia ao longo das grandes drenagens.

Formado por arenitos das Formação Pirambóia na base, e Botucatu no topo, todo pacote está assentado, em discordância angular, sobre o Grupo Passa Dois e parte dele, a porção confinada do Aquífero Guarani, está recoberto pelos derrames basálticos da Formação Serra Geral, o que ocorre em uma pequena porção no extremo oeste da área de estudo.

Sua porção aflorante possui extensão regional, porosidade granular, contínua, homogênea, isotrópica e livre, mergulhando regionalmente para sudoeste em contato superior com a Formação Serra Geral na parte confinada. Seu contorno estrutural pode atingir 800 metros de altitude, com uma espessura do pacote sedimentar variando entre 100 e 150 metros. Por sua vez, quando aparece confinado pela Formação Serra Geral sua profundidade, fora dos perímetros da UGRHI-PCJ, pode atingir até 400 metros ao longo da calha do Rio Tietê.

O fluxo regional da água subterrânea ocorre preferencialmente para sudoeste com um gradiente hidráulico chegando a 0,008. A condutividade hidráulica na área de recarga do Aquífero Guarani é de aproximadamente 3,0 m/dia, com um coeficiente de armazenamento de 0,17 e transmissividade de 260m²/dia.

A vazão (Q) explorável indica para a região livre do aquífero, faixas de exploração entre 20 a 40 m³/h e 40 e 80m³/h. A faixa de menor vazão pode conter vazões inferiores a 20m³/h nas áreas próximas à Formação Passa Dois, onde o aquífero apresenta as menores espessuras saturadas.

6.4. AQÜÍFERO BAURU

O aquífero Bauru apesar de representar o aquífero livre com maior área dentro do Estado de São Paulo, não ocorre dentro da UGRHI-PCJ. Contudo, a Formação Itaquerí é correlata ao Grupo Bauru e apresenta as mesmas características hidrogeológicas. É um aquífero livre, com extensão limitada, granular, heterogêneo e anisotrópico. Localmente localizado em uma estreita faixa situada no topo e no reverso das cuestas basálticas nos limites oeste e noroeste da UGRHI-PCJ, dentro da sub-bacia Corumbataí.

6.5. AQÜÍFERO SERRA GERAL

O aquífero cristalino Serra Geral apresenta-se em uma distribuição heterogênea sob formas de diques e soleiras da própria Formação Serra Geral. Possui extensão regional, fraturado, livre a semi-confinado, descontínuo e anisotrópico.

Caracterizado por sua elevada produção hídrica, principalmente quando comparado a aquíferos cristalinos mais antigos. Sua transmissividade varia entre 1 e 95 m²/dia, vazão média de 23 m³/h e o nível da água subterrânea dentro de suas fraturas, tanto de origem tectônica como por resfriamento do magma, podem atingir profundidades superiores a 50 metros.

A oeste estende-se sobre o Aquífero Guarani confinando-o. Localmente encontra-se aflorante em uma estreita faixa NS representando pouco mais de 0,5% em toda a UGRHI.

6.6. AQÜÍFERO DIABÁSIO

Esse aquífero é formado por corpos de diabásio associados ao mesmo evento vulcânico gerador da Formação Serra Geral, com profundidades variadas e geralmente associadas a rochas mais antigas. Possui extensão limitada, fraturado, livre a semi-confinado, heterogêneo, descontínuo e anisotrópico.

Apresenta uma capacidade específica três vezes menor que o Aquífero Serra Geral, sendo aflorante entre os aquíferos Guarani e Tubarão e o aquíclude Passa-Dois. Possui baixo potencial hídrico, podendo servir como barreira hidráulica, ou áreas com fluxo preferencial.

6.7. AQÜICLUDE PASSA DOIS

Servindo como espécie de barreira hidráulica, as formações pertencentes ao Grupo Passa Dois recebem a designação de aquíclude, pois possuem uma função “passiva” quanto à percolação de água subterrânea. Aflorando principalmente nas sub-Bacias Corumbataí e Piracicaba.

Esse aquíclude possui extensão regional, porosidade primária, livre a confinado, heterogêneo e anisotrópico. Apresentando em alguns locais uma espessura superior a 100 metros, é caracterizado por transmissividade muito baixa (<10m²/dia) e uma vazão média inferior a 10 m³/h.

7. USO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA E SUPERFICIAL

Dados do SEADE (2003) indicam que os Municípios integrantes da UGRHI-PCJ correspondem a 15,11% dos municípios que fazem uso exclusivo de água superficial dentro do Estado de São Paulo, por outro lado, sua participação na parcela dos municípios que fazem uso exclusivo de água subterrânea é de apenas 1,38% (**Quadro 1**).

Quadro 1: Quantidade de Municípios de acordo com o tipo de uso da água

| Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos | Superficial | | Subterrânea | | Superficial e Subterrânea |
|--|-------------|---------------------|-------------|---------------------|---------------------------|
| | Total | Somente Superficial | Total | Somente Subterrânea | |
| UGRHI-PCJ | 50 | 23 | 31 | 4 | 27 |
| ESTADO DE SÃO PAULO | 331 | 147 | 474 | 290 | 184 |
| UGRHI-PCJ % | 15,11 | 15,65 | 6,54 | 1,38 | 14,67 |

A UGRHI-PCJ produz 92,7% de toda água utilizada para consumo interno, sendo que apenas 7,3%, ou 3.453 m³/mês, são provenientes de Sistemas Produtores Integrados, enquanto que 43.018 m³/mês são provenientes de captações superficiais e 872 m³/mês provenientes de água subterrânea (SEADE, 2003) (**Quadro 2**).

Quadro 2: Volume de água utilizada por mês, por tipo de captação

| Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos | Proveniente de Sistemas Produtores Integrados (1.000 m ³ /mês) | | Captação Superficial (1) | | Captação Subterrânea (1) | |
|--|---|-------|--|-------|--|-------|
| | Volume de Água Produzida (1.000 m ³ /mês) | (%) | Volume de Água Produzida (1.000 m ³ /mês) | (%) | Volume de Água Produzida (1.000 m ³ /mês) | (%) |
| UGRHI-PCJ | 3.452 | 7,29 | 43.018 | 90,87 | 872 | 1,84 |
| ESTADO DE SÃO PAULO | 174.629 | 48,03 | 135.474 | 37,26 | 53.455 | 14,70 |
| UGRHI-PCJ % | 1,98 | | 24,63 | | 0,50 | |

Em CETESB (2004), foram apresentados valores alarmantes quanto à qualidade das águas superficiais dentro da UGRHI-PCJ. Os índices de avaliação da qualidade das águas para fins de abastecimento público (IAP) e das águas para proteção da vida aquática (IVA) indicaram uma classificação RUIM em 50% ou mais das águas (**Figura 3**), o que pode acarretar diversos problemas à saúde pública e à vida animal.

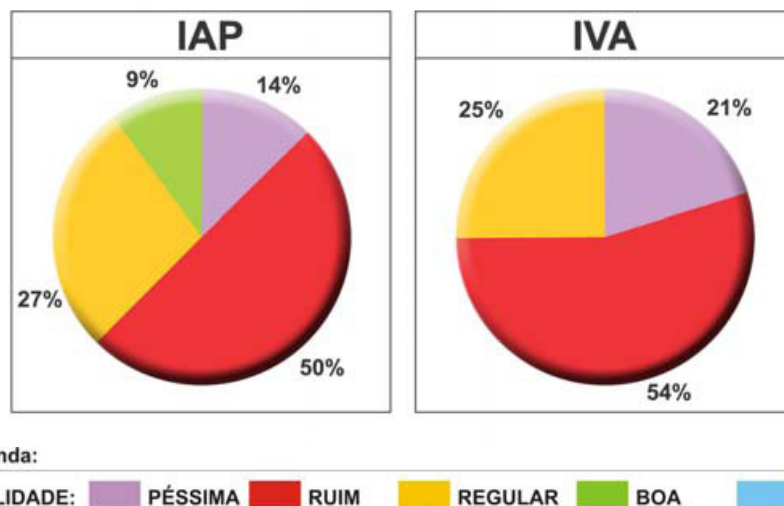


Figura 3: Qualidade das águas superficiais da UGRHI-PCJ segundo os índices de Águas para Fins de Abastecimento Público (IAP) e para as Águas para Proteção da Vida Aquática (IVA) (Retirado de CETESB, 2004).

Apesar do relativo baixo volume de água subterrânea utilizado para fins de abastecimento público, a existência da área de recarga (livre) do aquífero Guarani, aumenta sensivelmente o risco associado às atividades antrópicas, sobretudo nas áreas de recarga de aquíferos e das águas superficiais, que são tributárias aos aquíferos.

8. RESÍDUOS URBANOS

A evolução do tratamento dos resíduos urbanos gerados dentro da UGRHI-PCJ entre 1997 e 2005 mostra-se satisfatório no que se refere à média do Índice de Qualidade de Resíduos (IQR) atuais (**Tabela 2**). Este índice apresentou uma média de 7,8 em 2005 contra 5,3 em 1997, contudo nem todos os municípios apresentaram uma melhora no IQR.

Tabela 2: Enquadramento dos Municípios da UGRHI PCJ, quanto às condições de tratamento e disposição de resíduos domiciliares – IQR (CETESB, 2006)

| Municípios | Lixo (t/dia) | IQR 1997 | IQR 2005 |
|------------------------|--------------|----------|----------|
| Águas de São Pedro | 1 | 0 | 8,3 |
| Americana | 100 | 4,3 | 9,6 |
| Amparo | 19 | 7 | 7,5 |
| Analândia | 1 | 3,9 | 4,6 |
| Atibaia | 56 | 1,8 | 9,6 |
| Artur Nogueira | 16 | 4,9 | 9,6 |
| Bom Jesus dos Perdões | 5 | 1,9 | 6,9 |
| Bragança Paulista | 63 | 9,1 | 8,2 |
| Campinas | 718 | 7,5 | 8,8 |
| Campo Limpo Paulista | 30 | 7,9 | 8 |
| Capivari | 14 | 3,7 | 9,6 |
| Charqueada | 5 | 6,3 | 7,7 |
| Cordeirópolis | 7 | 6,6 | 9,6 |
| Corumbataí | 1 | 3,7 | 8,4 |
| Cosmópolis | 19 | 2,3 | 2,1 |
| Elias Fausto | 4 | 2,6 | 8,3 |
| Holambra | 2 | 8,7 | 7,5 |
| Hortolândia | 125 | 6,1 | 9,6 |
| Indaiatuba | 89 | 4,1 | 9,8 |
| Ipeúna | 2 | 5,5 | 6,2 |
| Iracemápolis | 7 | 1,4 | 8,1 |
| Itatiba | 30 | 4,8 | 8,9 |
| Itupeva | 9 | 7,8 | 8 |
| Jaguariúna | 12 | 2,6 | 9,6 |
| Jarinu | 6 | 7,9 | 8,8 |
| Joanópolis | 5 | 1,5 | 8,1 |
| Jundiaí | 191 | 7,9 | 8 |
| Limeira | 158 | 7,6 | 9,2 |
| Louveira | 10 | 7,9 | 8 |
| Mombuca | 1 | 6 | 4,8 |
| Monte Alegre do Sul | 2 | 7 | 7,5 |
| Monte Mor | 16 | 3,2 | 8,3 |
| Morungaba | 3 | 6,9 | 7,7 |
| Nazaré Paulista | 2 | 3,2 | 9,3 |
| Nova Odessa | 18 | 6,8 | 5,2 |
| Paulínia | 24 | 6,6 | 9,6 |
| Pedra Bela | 1 | 5,9 | 8,3 |
| Pedreira | 15 | 4,8 | 5,2 |
| Pinhalzinho | 2 | 2,2 | 7 |
| Piracaia | 10 | 3,2 | 5,8 |
| Piracicaba | 208 | 7,4 | 5,7 |
| Rafard | 3 | 2,4 | 8,4 |
| Rio Claro | 91 | 9,6 | 8,2 |
| Rio das Pedras | 10 | 6 | 4,8 |
| Saltinho | 2 | 6,1 | 8,3 |
| Salto | 53 | 6,2 | 9,4 |
| Santa Bárbara do Oeste | 91 | 7,5 | 8,8 |

Tabela 2: Enquadramento dos Municípios da UGRHI PCJ, quanto às condições de tratamento e disposição de resíduos domiciliares – IQR (continuação)

| Municípios | Lixo (t/dia) | IQR 1997 | IQR 2005 |
|------------------------|--------------|------------|------------|
| Santa Gertrudes | 8 | 5,7 | 8,2 |
| Santa Maria da Serra | 2 | 6,1 | 7,2 |
| Santo Antônio de Posse | 7 | 1,6 | 9,6 |
| São Pedro | 11 | 0 | 8,3 |
| Sumaré | 139 | 6,1 | 9,6 |
| Tuiuti | 1 | 3,6 | 3,9 |
| Valinhos | 35 | 9 | 9,6 |
| Vargem | 1 | 7,6 | 4,9 |
| Várzea Paulista | 54 | 7,9 | 8 |
| Vinhedo | 22 | 7,9 | 8 |
| Média UGRHI-PCJ | 44,5 | 5,3 | 7,8 |

A **Figura 4** indica a relação entre o desvio padrão dos IQRs entre 1997 e 2005, com relação à quantidade de resíduos produzidos por seus respectivos municípios.

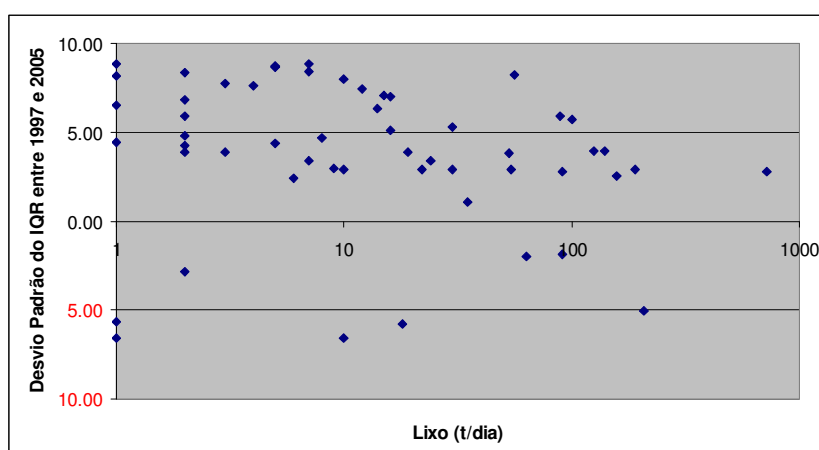


Figura 4: Desvio padrão do IQR de 1997 e 2005, com relação a produção diária de lixo doméstico de cada Município pertencente a UGRHI-PCJ.

O desvio padrão **S** (BOTTER *et al*, 1996) **(1)**, foi medido a partir da definição de que o IQR = 10 é o valor ótimo (meta) a ser atingido por todos os municípios.

$$S = \frac{\sqrt{(IQR_{97} - 10)^2 + (IQR_{05} - 10)^2}}{n - 1} \quad (1)$$

Aonde **S** é o desvio padrão, **IQR₉₇** e **IQR₀₅** são os índices de qualidade de resíduos em 1997 e 2005 respectivamente, e **n** o número de anos em que foram realizadas as medições do IQR que, no caso, é igual a 2 (1997 e 2005).

Apesar de o desvio padrão ser necessariamente um valor positivo, a **Figura 4** apresenta pontos abaixo do eixo **x**, ou seja, valores tipicamente “negativos”, esse destaque foi utilizado visando identificar graficamente a existência de municípios que tiveram uma redução do IQR entre os monitoramentos de 1997 a 2005. Sendo assim, foram identificados 8 municípios com uma redução do IQR.

Observando a **Figura 4**, podemos considerar que os Municípios geradores de até 30 toneladas de lixo por dia, apresentaram as maiores melhorias na forma do tratamento do resíduo. Por sua vez, os Municípios que geram mais de 31 toneladas tiveram uma melhoria menos significativa.

O município que apesar de sua importância econômica, estratégica e ambiental para o Estado de São Paulo, apresentou a maior queda do IQR foi Piracicaba. Esse Município gera aproximadamente 208 toneladas de lixo por dia. Em 1997 seu IQR era de 7,4, ou seja, um valor próximo ao de municípios de tamanho semelhante, tais como Jundiá e Limeira (7,9 e 7,6 respectivamente), porém, em 2005 seu índice foi de 5,8 enquanto Jundiá e Limeira alcançaram 8,0 e 9,2 respectivamente. No mesmo período, a média geral dos municípios passou de 5,3 para 7,8.

9. ATIVIDADES INDUSTRIAIS

O reconhecimento da distribuição espacial dos principais potenciais contaminantes de origem industrial é necessário para a definição das atividades que, em seu processo industrial, geram resíduos com poluentes não-persistentes, inferindo a possibilidade de diferentes índices de vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos.

Considera-se a “exclusividade” de poluentes não-persistentes, já que para os poluentes persistentes a decomposição do composto será inerente à capacidade de retenção e bioatividade do solo, já que a infiltração e o impacto da água subterrânea ocorrerão em algum momento, à exceção de condições geológicas e hidrogeológicas muito específicas.

Devido à falta de disponibilidade de informações cadastrais completas, não foi discernido sobre o tipo de fonte de contaminação (pontual, linear ou difusa), forma de armazenamento e descarte ou a localização dos empreendimentos. Para que estes dados fossem obtidos, seria necessário a elaboração e o preenchimento de

questionários específicos, eventuais entrevistas e trabalhos de campo, atividades que demandariam um tempo incompatível com o cronograma deste trabalho.

Por outro lado, existe a necessidade de se destacar algumas características que possam vir a impactar o aquífero para efeitos didáticos e práticos para a estimativa da vulnerabilidade de aquíferos. Dessa forma, a maioria, se não a totalidade dos estudos que necessitam de bancos de dados referentes às atividades industriais em operação dentro do Estado de São Paulo, utiliza o cadastro de indústrias da Cetesb.

Na expectativa de obter dados complementares, neste estudo foi utilizado o cadastro das indústrias do Estado de São Paulo associadas à Federação das Indústrias do Estado de São Paulo (“FIESP”) (FIESP, 2003). O número total de indústrias contidas nesse cadastro é de aproximadamente 17.000, distribuídas em 34 principais ramos de atividades. Foram considerados dois critérios para a definição dos ramos industriais a serem selecionados, sendo que, somente foram selecionados os que se encaixaram nos seguintes critérios:

- existência de determinado ramo de atividade industrial em operação nos Municípios pertencentes à UGRHI-PCJ; e
- atividades que signifiquem riscos de contaminação à água subterrânea, com compostos incluídos na Lista de Valores Orientadores para Solo e Água Subterrânea do Estado de São Paulo (CETESB, 2001).

A UGRHI-PCJ possui a segunda maior concentração industrial do Estado, atrás somente da UGRHI do Alto Tietê. As Tabelas 2 e 3 apresentam a quantidade de indústrias subdivida pelo ramo de atividade por Município pertencente à UGRHI-PCJ.

Tabela 3: Distribuição das indústrias de alimentos, bebidas, curtume, madeira, papel e celulose, gráfica e refino de petróleo por Município (consolidado de FIESP, 2003)

| MUNICÍPIOS | RAMO DE ATIVIDADE | | | | | | |
|-----------------------|-------------------|-----------|---------|---------|---------------------------|---------|--------------------|
| | TOTAL | ALIMENTOS | BEBIDAS | CURTUME | MADEIRA, PAPEL E CELULOSE | GRÁFICA | REFINO DE PETRÓLEO |
| Águas de São Pedro | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Americana | 67 | 7 | 1 | 0 | 1 | 5 | 1 |
| Amparo | 27 | 5 | 0 | 1 | 3 | 2 | 0 |
| Analandia | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Artur Nogueira | 8 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Atibaia | 46 | 8 | 1 | 0 | 1 | 3 | 0 |
| Bragança Paulista | 55 | 4 | 0 | 0 | 5 | 1 | 0 |
| Cabreúva | 16 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Campinas | 230 | 32 | 2 | 2 | 8 | 12 | 0 |
| Campo Limpo Paulista | 20 | 2 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Capivari | 18 | 3 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| Charqueada | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Cordeirópolis | 12 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 |
| Corumbataí | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Cosmópolis | 16 | 2 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| Elias Fausto | 5 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Holambra | 4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| Hortolândia | 29 | 2 | 0 | 0 | 3 | 2 | 0 |
| Indaiatuba | 134 | 5 | 0 | 0 | 6 | 6 | 0 |
| Ipeuna | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Iracemápolis | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Itatiba | 38 | 6 | 1 | 0 | 4 | 4 | 0 |
| Itirapina | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Itupeva | 45 | 8 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 |
| Jaguariúna | 15 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Jarinu | 7 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Joanópolis | 3 | 2 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Jundiaí | 145 | 24 | 9 | 1 | 10 | 6 | 0 |
| Limeira | 137 | 5 | 0 | 0 | 16 | 5 | 0 |
| Louveira | 23 | 4 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 |
| Mairiporã | 21 | 3 | 0 | 0 | 2 | 2 | 0 |
| Mombuca | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Monte Alegre do Sul | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Monte Mor | 3 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| Morungaba | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Nazaré Paulista | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Nova Odessa | 4 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 |
| Paulínia | 9 | 6 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 |
| Pedra Bela | 26 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Pedreira | 24 | 2 | 1 | 0 | 0 | 1 | 2 |
| Pinhalzinho | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Piracaia | 11 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Piracicaba | 28 | 15 | 2 | 2 | 7 | 1 | 0 |
| Rafard | 5 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Rio Claro | 131 | 13 | 3 | 1 | 6 | 7 | 3 |
| Rio das Pedras | 10 | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Saltinho | 55 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| Salto | 21 | 3 | 0 | 2 | 9 | 0 | 0 |
| Santa Bárbara D'Oeste | 14 | 2 | 1 | 0 | 5 | 5 | 0 |
| Santa Gertrudes | 37 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Santa Maria da Serra | 51 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabela 3a: Distribuição das indústrias de alimentos, bebidas, curtume, madeira, papel e celulose, gráfica e refino de petróleo, por Município (continuação)

| MUNICÍPIOS | RAMO DE ATIVIDADE | | | | | | |
|------------------------|-------------------|------------|-----------|-----------|---------------------------|-----------|--------------------|
| | TOTAL | ALIMENTOS | BEBIDAS | CURTUME | MADEIRA, PAPEL E CELULOSE | GRÁFICA | REFINO DE PETRÓLEO |
| Santo Antonio de Posse | 6 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| São Pedro | 9 | 1 | 2 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| Sumaré | 47 | 4 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Tuiuti | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Valinhos | 76 | 13 | 0 | 0 | 8 | 7 | 0 |
| Vargem | 23 | 1 | 0 | 0 | 3 | 1 | 0 |
| Várzea Paulista | 28 | 3 | 0 | 0 | 5 | 1 | 0 |
| Vinhedo | 29 | 5 | 0 | 5 | 3 | 0 | 0 |
| TOTAL | 1809 | 210 | 31 | 14 | 126 | 76 | 10 |

Tabela 4: Distribuição das indústrias química, borracha, plásticos, metalurgia, médico hospitalar e automotiva, por Município (consolidado de FIESP, 2003)

| MUNICÍPIOS | RAMO DE ATIVIDADE | | | | | |
|----------------------|-------------------|----------|-----------|------------|-------------------|------------|
| | QUÍMICA | BORRACHA | PLÁSTICOS | METALURGIA | MÉDICO HOSPITALAR | AUTOMOTIVA |
| Águas de São Pedro | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Americana | 5 | 3 | 12 | 27 | 2 | 3 |
| Amparo | 2 | 1 | 0 | 8 | 1 | 4 |
| Analandia | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Artur Nogueira | 1 | 0 | 3 | 3 | 0 | 0 |
| Atibaia | 0 | 1 | 6 | 22 | 2 | 2 |
| Bragança Paulista | 7 | 1 | 6 | 28 | 0 | 3 |
| Cabreúva | 0 | 0 | 6 | 8 | 0 | 0 |
| Campinas | 31 | 5 | 22 | 97 | 17 | 2 |
| Campo Limpo Paulista | 3 | 2 | 1 | 9 | 0 | 2 |
| Capivari | 3 | 0 | 1 | 5 | 0 | 2 |
| Charqueada | 1 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 |
| Cordeirópolis | 0 | 0 | 0 | 10 | 0 | 0 |
| Corumbataí | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Cosmópolis | 8 | 0 | 1 | 2 | 0 | 0 |
| Elias Fausto | 0 | 0 | 1 | 2 | 0 | 1 |
| Holambra | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| Hortolândia | 2 | 1 | 4 | 11 | 0 | 4 |
| Indaiatuba | 15 | 0 | 6 | 79 | 1 | 16 |
| Ipeuna | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| Iracemápolis | 0 | 0 | 2 | 6 | 0 | 2 |
| Itatiba | 8 | 0 | 3 | 9 | 0 | 3 |
| Itirapina | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Itupeva | 7 | 2 | 10 | 12 | 1 | 1 |
| Jaguariúna | 3 | 0 | 3 | 6 | 0 | 1 |
| Jarín | 2 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| Joanópolis | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Jundiaí | 9 | 1 | 24 | 54 | 1 | 6 |
| Limeira | 3 | 2 | 6 | 87 | 0 | 13 |
| Louveira | 5 | 1 | 6 | 3 | 0 | 0 |
| Mairiporã | 2 | 2 | 2 | 6 | 1 | 1 |
| Mombuca | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Monte Alegre do Sul | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Monte Mor | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Morungaba | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Nazaré Paulista | 2 | 0 | 2 | 5 | 1 | 0 |

Tabela 4a: Distribuição das indústrias química, borracha, plásticos, metalurgia, médico hospitalar e automotiva, por Município (continuação)

| MUNICÍPIOS | RAMO DE ATIVIDADE | | | | | |
|------------------------|-------------------|-----------|------------|------------|-------------------|------------|
| | QUÍMICA | BORRACHA | PLÁSTICOS | METALURGIA | MÉDICO HOSPITALAR | AUTOMOTIVA |
| Nova Odessa | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| Paulínia | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Pedra Bela | 2 | 0 | 0 | 23 | 1 | 0 |
| Pedreira | 15 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| Pinhalzinho | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Piracaia | 0 | 0 | 0 | 8 | 0 | 2 |
| Piracicaba | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Rafard | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| Rio Claro | 9 | 6 | 3 | 75 | 0 | 5 |
| Rio das Pedras | 1 | 0 | 0 | 4 | 0 | 1 |
| Saltinho | 11 | 1 | 8 | 26 | 6 | 1 |
| Salto | 0 | 0 | 0 | 5 | 0 | 2 |
| Santa Bárbara D'Oeste | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Santa Gertrudes | 7 | 2 | 0 | 20 | 1 | 7 |
| Santa Maria da Serra | 3 | 2 | 7 | 35 | 0 | 4 |
| Santo Antonio de Posse | 0 | 0 | 1 | 2 | 1 | 1 |
| São Pedro | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 |
| Sumaré | 7 | 1 | 8 | 22 | 0 | 4 |
| Tuiuti | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Valinhos | 12 | 3 | 8 | 19 | 0 | 6 |
| Vargem | 4 | 0 | 3 | 11 | 0 | 0 |
| Várzea Paulista | 2 | 2 | 1 | 10 | 2 | 2 |
| Vinhedo | 5 | 0 | 3 | 8 | 0 | 0 |
| TOTAL | 198 | 40 | 182 | 779 | 40 | 103 |

As Tabelas 3 e 4 indicam que existem 1809 indústrias dos ramos selecionados associadas à FIESP. Os Municípios de Campinas, Jundiaí, Limeira, Indaiatuba e Rio Claro com respectivamente 230, 145, 137, 134 e 131 possuem o maior número de unidades industriais instaladas. Do outro lado, os Municípios de Águas de São Pedro, Mombuca e Pinhalzinho não possuem indústrias associadas à FIESP.

Os ramos industriais com maior freqüência dentro da UGRHI-PCJ são a metalúrgica, alimentos, química e plásticos com 779, 210, 198 e 182 unidades respectivamente. E as com menor freqüência são as indústrias de refino de petróleo, curtume, bebidas, médico hospitalar com respectivamente 10, 14, 31, 40 e 40 ocorrências.

10. VULNERABILIDADE DE AQÜÍFEROS

O National Research Center (NRC) em 1993 definiu a vulnerabilidade da água subterrânea à contaminação como: "A tendência ou possibilidade de contaminantes atingirem uma posição específica no sistema da água subterrânea após o impacto em algum ponto acima do aqüífero mais próximo à superfície" (SOPER, 2002).

Por sua vez, o termo “vulnerabilidade natural de um aquífero” pode ser definido como o primeiro passo para a avaliação da susceptibilidade do aquífero de vir a ser contaminado. Dependente de diversos fatores como geologia, geomorfologia, espessura da camada não saturada, recarga natural, escoamento superficial, exploração da água e outros.

Devido à vasta gama de dados passíveis de serem estimados, e que, em muitos casos acabam se mostrando economicamente inviáveis, na prática ocorre uma redução estratégica da lista de parâmetros requeridos de acordo com a escala e objetivo do trabalho.

Dependente de diversos fatores ambientais, a estimativa da vulnerabilidade da água subterrânea é uma avaliação da predição do processo que está ocorrendo abaixo da superfície da terra. Indicando as propriedades relativas à vulnerabilidade, a incerteza e as entrelinhas do processo. A avaliação da água subterrânea é a melhor forma de uma interação com o processo que é continuamente modificado e melhorado, de acordo com a viabilidade de novas informações (NRC, 1993 apud SOPER, 2002).

Civita (1993) (apud IBE *et al*, 1999), reuniu em quatorze os parâmetros utilizados por diversos modelos de estimativa de vulnerabilidade aplicados no mundo, sendo eles:

- precipitação e sua composição química;
- declividade topográfica;
- densidade da rede de fluxo da água subterrânea;
- espessura, textura, mineralogia, umidade;
- permeabilidade e propriedades químicas do solo;
- conexões do aquífero com corpos de água superficiais;
- rede de recarga;
- características da zona vadosa;
- profundidade do nível da água subterrânea;
- mudanças do nível de água;
- características hidrobiológicas e
- condutividade hidráulica do aquífero.

Por sua vez, o termo Vulnerabilidade e Risco de Contaminação é a associação da vulnerabilidade natural à carga potencial poluidora, que acarrete na concentração de contaminantes da água subterrânea, com valores analíticos acima dos padrões de potabilidade definidos em lei (IG et al., 1997).

Dependendo do enfoque desejado para mapear a avaliação do risco de contaminação de aquíferos, Foster et al. (2002) indicou duas estruturas diferentes de acordo com a escala de trabalho (**Quadro 3**).

Quadro 3: Enfoque e aplicação dos diferentes níveis de avaliação de risco de contaminação da água subterrânea. (Modificado de Foster et al. 2002)

| ENFOQUE NA PROTEÇÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS | ENFOQUE NA PROTEÇÃO DAS FONTES DE ÁGUA |
|---|---|
| 1:1.000.000 - 250.000 | 1:25.000 – 100.000 |
| Agências ambientais e reguladoras estaduais e federais | Órgãos públicos e empresas privadas de serviço de água e administração municipal |
| Avaliação da importância sócio-econômica dos recursos hídricos subterrâneos | Definição das áreas de proteção das fontes de água subterrânea (incluindo a condição sanitária da cabeça do poço) |
| Mapa de vulnerabilidade e poluição dos aquíferos | Estimativa da vulnerabilidade de contaminação do aquífero |
| Determinação das principais fontes de contaminação da água subterrânea | Inventário detalhado das cargas contaminantes no subsolo |
| Avaliação global do risco de contaminação do aquífero | Avaliação do risco de contaminação da fonte Estratégias de monitoramento de água subterrânea e medidas de controle do risco. |
| PRINCIPAIS APLICAÇÕES | PRINCIPAIS APLICAÇÕES |
| Levantamento primário / Desenvolvimento de políticas para a conscientização da sociedade e setores interessados | Proteção da fonte de água subterrânea, levantamento e controle do uso do solo |

No mesmo estudo, os autores apresentam duas questões fundamentais com relação à vulnerabilidade e a contaminação de aquíferos, onde indagaram:

- apresentar um índice de vulnerabilidade integrado único ou, trabalhar com índices de vulnerabilidade específica para cada contaminante e cenário de contaminação? ou
- prover um indicador da vulnerabilidade integrada com a contaminação ou restringir a índices de vulnerabilidade relativos que seria de menor utilidade ?

Essas questões por si impõem ao profissional sérias e variadas dúvidas quando da aplicação de mapas de vulnerabilidade para a estimativa de risco baseado em contaminantes específicos. Na prática, principalmente para mapeamentos em grande escala (>1:250.000), ocorre a subdivisão em ao menos dois mapas, um de vulnerabilidade e risco de contaminação natural (global) e outro da carga (potencial) contaminante.

Em NRC (1993) (apud Hirata, 2001), são definidas três “leis” (premissas) da vulnerabilidade de aquíferos:

- os aquíferos são todos vulneráveis em algum grau;
- a incerteza é inerente a todas as cartografias de vulnerabilidade e
- o risco que o óbvio possa ser obscurecido e o sutil indistinguível existe sempre.

Do mesmo modo, o mapa de vulnerabilidade de aquíferos tem seu uso adequado somente quando duas situações são evitadas (Foster et al, 2002):

- descargas profundas de contaminantes diretamente abaixo da superfície do solo; e
- contaminação por compostos orgânicos sintéticos densos imiscíveis (DNAPLs).

10.1. APLICAÇÃO

Diversos estudos orientadores aos órgãos ambientais e de controle, referentes à predição de áreas de maior vulnerabilidade de contaminação natural e antrópica, vêm sendo desenvolvidos no Brasil e no mundo. Dentre estes, dois conceitos foram discutidos extensivamente nesses últimos anos: a *vulnerabilidade natural dos aquíferos* e, a *vulnerabilidade e risco de contaminação dos aquíferos* (Albinet e

Margat, 1970; Haertle, 1983; Aller e outros, 1987 apud Foster *et al.*, 2002; Foster e Hirata, 1998; IBE et al, 1999).

Naturalmente, as principais intenções ao se estimar a vulnerabilidade de aquíferos é a preservação dos recursos hídricos e a definição de perímetros para a proteção das áreas utilizadas para abastecimento público. Apesar de tão importante quanto, esse segundo tema não é foco de discussão nessa dissertação.

Em linhas gerais a vulnerabilidade à poluição de aquíferos poder ser utilizada para (Hirata, 2001):

- expressar as características intrínsecas que determinam a sensibilidade de um aquífero ser adversamente afetado por uma carga contaminante antrópica imposta;
- classificação dos aquíferos baseada na importância do recurso hídrico que é ou será utilizado no presente e no futuro, incluindo a possibilidade de ser substituído por outro recurso; e
- classificação baseada na importância do aquífero em manter áreas ecologicamente importantes.

Sendo assim, a definição hidrogeológica da vulnerabilidade é uma composição de todos os principais fatores geológicos e hidrológicos que afetam e/ou controlam o movimento da água subterrânea dentro e fora de uma determinada área. Por associação, a semelhança hidrogeológica de duas áreas mapeadas acarreta no mesmo índice de vulnerabilidade estimado.

O mapa de Vulnerabilidade e Risco de Poluição das Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo (IG, CETESB e DAEE, 1997), em sua nota explicativa, esclarece muito bem que:

“... ao usar esse mapa ... deve-se ter em mente que não existe uma vulnerabilidade geral a um contaminante universal, num cenário típico de contaminação. A validade técnica desta cartografia pode ser assumida desde que fique claro que este índice não se refere a poluentes móveis e persistentes que não sofram retenção significativa ou transformação durante o transporte em subsuperfície...”

Segundo Foster *et al.* (2002) certas condições hidrogeológicas geram problemas para a avaliação e mapeamento da vulnerabilidade à contaminação de aquíferos:

- a presença de cursos superficiais permanentes ou intermitentes devido a incertezas quanto à condição hidrológica, classificação da qualidade do curso de água e variabilidade da capacidade de atenuação;
- a exploração excessiva dos aquíferos que pode produzir variações na profundidade do nível da água;
- as argilas extremamente consolidadas aonde existam imprecisões com relação a eventuais componentes de fluxo preferencial.

10.2. MODELO GOD

Segundo Foster *et al.* (2002), a metodologia empírica GOD proposta para a estimativa da vulnerabilidade de um aquífero envolve:

- identificação do grau de confinamento da água subterrânea (aquífero livre, semi confinado, confinado) (*Groundwater Confinement – G*);
- caracterização da camada de solo acima da zona não saturada considerando seu grau de consolidação e litologia específica incluindo camada confinante (*Overlying Strata – O*) e
- determinação da profundidade do nível da água subterrânea (*Depth to Groundwater – D*).

O índice de vulnerabilidade é obtido a partir do produto entre esses três fatores (CAMPONOGARA *et al.* 2004) derivando na determinação das classes de vulnerabilidade. Foster e Hirata (1998) subdividiu as classes de vulnerabilidade em cinco categorias, sendo que sua definição prática e respectivos índices de vulnerabilidade associados estão apresentados no **Quadro 4**.

Quadro 4: Classes de vulnerabilidade de poluição de aquíferos (Foster e Hirata, 1998)

| CLASSES DE VULNERABILIDADE | DEFINIÇÃO PRÁTICA | ÍNDICE DEVULNERABILIDADE |
|----------------------------|---|--------------------------|
| Extrema | Vulnerabilidade a muitos poluentes, com rápido impacto em muitos cenários de contaminação. | 0,7 – 1,0 |
| Alta | Vulnerável a muitos poluentes, exceto aqueles muito pouco móveis e pouco persistentes | 0,5 – 0,7 |
| Moderada | Vulnerável a alguns poluentes, mas somente quando continuamente lançado. | 0,3 – 0,5 |
| Baixa | Somente vulnerável a contaminantes conservativos em longo prazo, quando continuamente e amplamente lançado. | 0,1 - 0,3 |
| Desprezível | Camadas confinantes com fluxo vertical descendente não significativo. | 0 - 0,1 |

Dessa forma, é possível assumir que o modelo GOD estima a vulnerabilidade a partir do estudo da zona vadosa (espessura, camada confinante e litologia). Aplicando constantes entre 0 e 1 para cada variável e o produto entre essas variáveis determina o índice de vulnerabilidade, partindo da vulnerabilidade nula à extrema, com os índices intermediários de baixa, média e alta vulnerabilidades. Todos os parâmetros possuem o mesmo peso de influência sobre o índice final.

$$\text{Índice de Vulnerabilidade} = G_i * O_i * D_i \quad (2)$$

Onde, **G O D** são os parâmetros utilizados, e **i** o índice de classificação de cada parâmetro. A Figura 5 apresenta o sistema de avaliação utilizado para a estimativa de vulnerabilidade e risco de contaminação do Estado de São Paulo (IG, CETESB e DAEE, 1997).

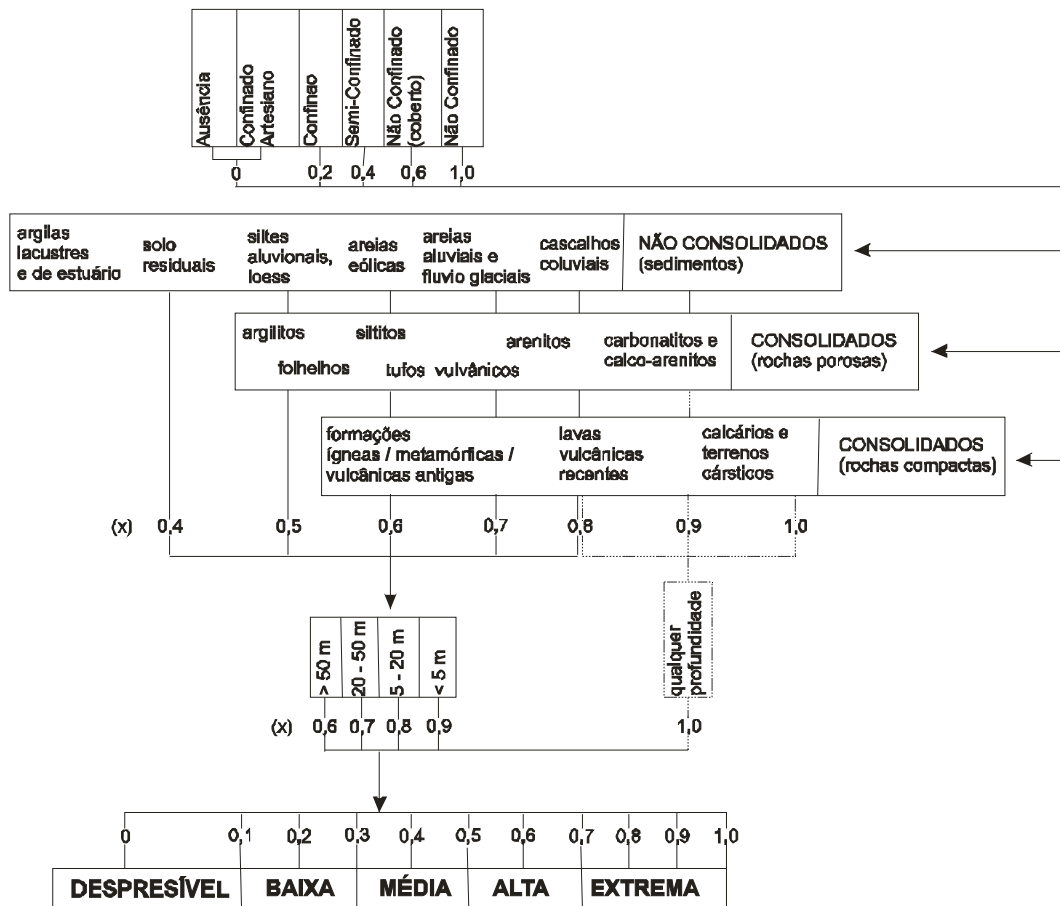


Figura 5: Sistema de avaliação do índice de vulnerabilidade natural de aquíferos (traduzido de Foster et al., 2002)

11. CONCEITOS DE HIDROGEOLOGIA APLICADOS AO ESTUDO DE VULNERABILIDADE DE AQUÍFEROS

A seguir serão apresentados alguns conceitos hidrogeológicos abordados em estudos diversos sobre a estimativa da vulnerabilidade de aquíferos. Conceitos como as características da zona vadosa, transporte e recarga hidráulica.

11.1. ZONA VADOSA

A zona vadosa pode ser descrita como o meio geológico em que está abaixo da superfície do terreno, mas acima do nível de água subterrânea do aquífero saturado mais raso. Inclui a zona não saturada do aquífero composta por diversos tipos de substratos (solo de alteração, coluvionar, aluvionar, orgânico e outros), franja capilar e efluente de recarga (SELKER *et al.*, 1999).

A compreensão de alguns fatores referentes às características naturais da zona vadosa é essencial para a estimativa do índice de vulnerabilidade. Segundo Foster et al (1993) o movimento de água na zona vadosa é geralmente lento e restrito aos poros menores com uma grande superfície específica. Os ambientes aeróbicos e freqüentemente alcalinos resultam em um potencial considerável para:

- a interceptação, sorção e eliminação de microorganismos patogênicos;
- a atenuação de metais pesados e outras substâncias químicas inorgânicas, mediante precipitação (como carbonatos, sulfetos ou hidróxidos), sorção ou intercâmbio de cátions;
- a sorção e a biodegradação de muitos hidrocarbonetos e compostos orgânicos naturais e sintéticos.

Para o entendimento dos mecanismos de fluxo e transporte que ocorre na zona vadosa, considera-se esta zona sendo constituída por três fases: sólida, líquida e gasosa, sendo cada uma dessas fases constituída pela mistura das três em inumeráveis proporções.

A fase gasosa é composta pelos gases presentes na atmosfera como nitrogênio, oxigênio, gás carbônico e vapor de água, assim como oriundos de processos bióticos que ocorrem dentro da própria zona vadosa, como gás carbônico e amônio.

A fase líquida é composta essencialmente por água e íons transportados como metais, sais e outros compostos de origem natural ou não. Por último, contribuindo com a maior parcela, a fase sólida constituída principalmente por sedimentos e matéria orgânica.

Existem dois sentidos de fluxo vertical dentro da zona vadosa: 1) ascendente realizado pela evaporação e pela elevação da franja capilar condicionada pela tensão superficial e diferença de pressão e 2) descendente proveniente da recarga natural ou antrópica (no caso de uma contaminação), condicionada pela tensão superficial, diferença de potencial, pressão e gravidade.

Por esses, e outros motivos, existem algumas relações e diferenças principais entre a zona vadosa e a zona saturada do aquífero que devem ser ressaltadas. O **Quadro 5** apresenta tais relações, como indicado por Selker *et al.* (1999).

Quadro 5: Relações entre zona vadosa e zona saturada

| SEMELHANÇAS ENTRE ZONA SATURADA E ZONA VADOSA | | |
|---|--|---|
| Ambas possuem equações de fluxo lineares para gradientes hidráulicos locais | | |
| Ambas são constituídas pela mesma composição do meio (areia, silte, argila ...) | | |
| DIFERENÇAS | ZONA VADOSA | ZONA SATURADA |
| Condutividade hidráulica | Função não linear de acordo com o conteúdo de água | Constante |
| Efeitos de densidade | Influência pouco efetiva para alterações relacionadas à mudança de temperatura e solução | Tanto a disposição estática quanto a dinâmica são influenciadas pelas alterações de temperatura e solução |
| Variabilidade espacial | Distribuição lognormal em função da quantidade de água no meio | Distribuição lognormal fixa no tempo |
| Atividades químicas e biológicas | Geralmente associada a rápidas atividades microbióticas, ricas em carbono e oxigênio | Geralmente sem oxigênio livre e carbono disperso: baixa atividade microbiótica comparativa |
| Mecanismos de transporte | Advecção...0-10 cm/dia Dispersão...0.5-20 cm Difusão...0.1-0.3 cm ² /s | Advecção...0-100 cm/dia Dispersão...0.5-20 cm Difusão...0.00002 cm ² /s |

Variação da Condutividade Hidráulica, Infiltração e Fluxo na Zona Vadosa

O comportamento do fluxo de água dentro da zona vadosa difere-se na variação da condutividade hidráulica de acordo com o volume de água dentro dos poros na zona não saturada (BUCKINGHAM, 1907 apud SELKER *et al.*, 1999), podendo ser expressa pela adaptação da lei de Darcy como:

$$q = -K(\theta) \cdot \Delta H \quad (3)$$

Onde, **q** é o fluxo de água igual à variação volumétrica de água no meio (**- K(θ)**) que multiplica o gradiente hidráulico associado **ΔH**.

Da mesma forma, Guymon (1994) conceitua de acordo com a Lei de Darcy a velocidade **v** de infiltração na zona vadosa como:

$$v = -K(\psi) \frac{\partial \Phi}{\partial z} \quad (4)$$

Sendo z verticalmente positivo e $\Phi = \psi + (z = z_0)$, K a condutividade hidráulica em função de ψ que é a quantidade volumétrica de água dentro dos poros e Φ a diferença de potencial.

Seguindo o raciocínio de Darcy, ao início do processo de recarga próximo à superfície, a tensão superficial inter-poros é quase ou igual à atmosférica (por convenção, a pressão atmosférica será considerada como zero e, assim, pressões naturais podem atingir valores negativos), dessa forma, a velocidade e a condutividade hidráulica tendem a valores muito baixos.

Contudo, a diferença de potencial Φ é grande, significando em uma taxa de infiltração inicial elevada. Com a continuidade da recarga, a infiltração atinge profundidades superiores e a diferença de potencial diminui, porém, a quantidade volumétrica de água ψ aumenta, aumentando a condutividade hidráulica e, conseqüentemente, aumentando a velocidade de infiltração v . De qualquer modo, v não pode ser maior que a taxa de infiltração máxima que está relacionada ao tipo de solo.

Segundo Selker et al (1999), existem três razões para que ocorra a variação da condutividade hidráulica dentro da zona não saturada:

- *poros maiores esvaziam primeiro*: os poros maiores são aqueles com menor resistência ao fluxo, já que, quanto maior a área menor a redução da tensão superficial;
- *linhas de fluxo aumentam com o comprimento*: a tendência de fluxo faz com que as partículas de água evitem poros vazios, fazendo com que existam caminhos preferenciais e tortuosos e
- *existem menos secções de fluxo*: em qualquer área normal ao fluxo, todo o fluido passará pela menor porção desta área.

Logo, para encontrarmos a variável desta equação, ou seja, a variação volumétrica do fluxo de água em um meio não saturado, faz-se uso da equação dada pela Lei de Richards (Selker et al, 1999) onde:

$$\frac{\sigma\theta}{\sigma} = \Delta.[K(\theta).\Delta H] \quad (5)$$

Sendo, $\sigma\theta$ a variação do volume de água relativo à variação do tempo σt que, por sua vez, é uma variável independente, K como a condutividade do meio em função da quantidade volumétrica de água dentro dos poros (θ) e, H a carga hidráulica local.

Esta equação nos permite estabelecer, a partir de dados de campo, a velocidade de fluxo variando sobre as diferentes condutividades hidráulicas verticais. Contudo, a obtenção em campo dos dados apresenta diversas dificuldades práticas para sua correta coleta.

Coleta da Dados na Zona Vadosa

A *American Society for Testing and Materials* (ASTM) é uma instituição que determina as normas e práticas reconhecidas pela agência ambiental norte americana (USEPA – *United States Environmental Protection Agency*). A norma 4696-92: “*Standard guide for pore-liquid sampling from the vadose zone*” (ASTM, 1996) define as premissas e exigências técnicas a serem adotadas em campo para a coleta de dados da relação poro-líquido na zona vadosa, e também identifica cada tipo de amostrador (sucção, drenagem livre, absorção experimental e retenção de líquidos) suas limitações e usos.

A definição para a escolha do melhor método de coleta a ser empregado em uma área depende de diversos fatores técnicos, como: espessura da zona vadosa, volume de amostra necessária, características geotécnicas do solo, química e natureza do líquido a ser amostrado, umidade e fluxo da água subterrânea.

O método mais comumente aplicado, devido à disponibilidade do equipamento no mercado e custos, é o método por sucção através do uso de lisímetros de pressão e/ou a vácuo, que indica a quantidade volumétrica de água dentro dos poros da zona vadosa e possibilita sua amostragem.

Por sua vez, a medida da pressão matricial na zona vadosa é feita com a utilização de tensiômetros de pressão que, em linhas gerais, estabelece uma conexão da carga hidráulica contida na zona vadosa, a partir do nível de pressão medido pelo aparelho.

A ASTM também estabelece uma norma para o uso de tensiômetros, a ASTM 3404-91: “*Standard guide for measuring matric potential in the vadose zone using tensiometers*” (ASTM, 1996a). De acordo com essa norma, foram Richards, L.A. e Gardner, W. que, em 1936, deram origem ao nome e aplicação deste aparelho. Apesar de diversas modificações desde sua criação, o tensiômetro manteve-se inalterado, tanto com relação aos seus componentes básicos, como quanto aos procedimentos para sua instalação em campo.

O tensiômetro é composto por um cilindro (“caneca”) poroso, geralmente de cerâmica, conectado a um sensor de pressão preenchido por água (ou outro líquido de características conhecidas, como álcool). O cilindro poroso é introduzido e enterrado no solo e, transmite a pressão poro-água para o medidor de tensão. Em uma situação normal, o cilindro poroso previne a subida de gases da zona vadosa para o medidor de tensão, não comprometendo sua aferição.

A instalação de diversos tensiômetros em profundidades diferentes resulta no levantamento da variação da pressão de acordo com a profundidade. Com isso, podem ser estimadas a altura da franja capilar, a capacidade de recarga pluviométrica ou de recarga artificial e a quantidade volumétrica.

11.2. TRANSPORTE

O fluxo vertical da água e o transporte de contaminantes desde sua fonte na superfície até o nível saturado do aquífero é um processo geralmente muito lento e, em muitos casos, acarreta no atraso de anos ou até mesmo décadas para que alguns contaminantes possam ser detectados, quanto mais, controlados.

Segundo Guymon (1994) existem cinco mecanismos pelo qual o soluto é transportado pela água subterrânea dentro da zona vadosa: advecção, dispersão, retardação, transformação química e volatilização.

Advecção é o processo de transporte mais intenso em um meio poroso. Ocorre quando os compostos dissolvidos, não-imiscíveis, agregam íons à água e são transportados na mesma velocidade da água subterrânea.

Dispersão mecânica é causada pelo deslocamento transversal do solvente de acordo com o arranjo dos grãos e obstrução do caminho em que o fluxo laminar está percorrendo.

Dispersão hidrodinâmica é causada pelo efeito de diferença de velocidade de fluxo local entre poros, aonde as linhas de fluxo próximas aos grãos possuem uma velocidade menor e as linhas mais ao centro dos poros possuem uma velocidade maior.

Retardação é o processo de adsorção ou retardação resultado da atração elétrica, que ocorre entre a energia estática da superfície do grão e as cargas iônicas de polaridade oposta dissolvidas na água.

Transformação química é o processo pelo qual o composto é alterado de forma orgânica ou inorgânica de acordo com seu transporte pela zona saturada, relativo ao tempo de exposição, ao tipo volume e a freqüência do descarte do contaminante.

Volatilização de compostos dissolvidos é mais importante quando a contaminação é por compostos voláteis. É o processo que transfere energia do composto em fase líquida para fase gasosa, podendo ser transportado para fora da zona vadosa e, conseqüentemente, para a atmosfera.

Selker et al. (1999) apresenta a equação de advecção-dispersão (ADE) para determinação do transporte unidimensional do soluto na zona vadosa. A ADE tem como premissa a conservação de massa ao longo do transporte, independentemente do mecanismo. Em linhas gerais, pode ser sumarizada como a “alteração do armazenamento ao longo do tempo, sendo igual ao fluxo de entrada e saída adicionado o volume da fonte e vazamentos.”.

Para a estimativa de vulnerabilidade de aquíferos a equação ADE não é aplicável, pois sugere a conservação de massa independentemente de fatores imprescindíveis como: profundidade do nível da água, zona vadosa, solo, recarga, tipo de aquífero e outros. Sendo assim, o contaminante atingirá a água subterrânea em algum momento, critério não aplicável conceitualmente para a estimativa de vulnerabilidade de aquíferos, à exceção de casos em que ocorre a contaminação por compostos persistentes.

11.3. RECARGA HIDRÁULICA

A recarga hidráulica é conceitualmente aceita como o fluxo descendente de água, que atinge o nível da água subterrânea como aditivo à reserva de água no aquífero. A interação com o clima, geologia, geomorfologia, condição do solo e vegetação determina o processo de recarga.

A percolação profunda da água em regiões úmidas é basicamente controlada pelo potencial de precipitação (pluviometria decrescida da evapotranspiração), a capacidade de infiltração do solo e a capacidade de transporte e armazenamento da zona vadosa. Regiões com baixa densidade de vegetação em um solo permeável ou em rocha fraturada próxima à superfície, junto a altos índices pluviométricos, geram uma condição favorável à recarga.

As diversas fontes de recarga para o aquífero são bem conhecidas. Os principais mecanismos de recarga para essas fontes foram conceitualmente definidas por Lerner *et al.* (1990) apud Jacobus e Simmers (2002):

- *recarga direta*: adição de água ao aquífero em excesso da diferença entre umidade do solo e a evaporação pela percolação vertical através da zona vadosa;
- *recarga indireta*: percolação para o nível da água ao longo dos corpos de água superficial e
- *recarga localizada*: uma forma intermediária de recarga resultante da concentração horizontal em superfície da água na ausência de canais de escoamento.

Essa recarga pode ocorrer pelos processos de:

- percolação difusa, tanto no fluxo de água na zona vadosa como nas regiões saturadas;
- fluxo em macroporos através de canais, rachaduras e fissuras;
- fluxo preferencial causado pelas frentes instáveis e diferenciações físicas do solo e/ou
- variações decorrentes do uso e ocupação do solo como em regiões urbanas e agrícolas.

Uma das diversas formas de se obter os valores de recarga de um aquífero é a partir do estudo do balanço hídrico da bacia hidrográfica em questão, podendo ser expresso por:

$$P + Q_{on} = ET + Q_{off} + \Delta S \quad (6)$$

Onde, **P** é a precipitação pluviométrica e irrigação; **Q_{on}** e **Q_{off}** são respectivamente os fluxos de água de entrada e de saída da bacia, **ET** é a evapotranspiração e **ΔS** é a variação na reserva de água subterrânea.

O modo mais comum de se estimar a recarga a partir do balanço hídrico é a partir da definição do “resíduo” – **R'**, onde todas as variáveis dentro do sistema à exceção de **R'** são mensuráveis ou estimáveis, e **R'** é a diferença entre **P+Q_{on}** e **ET+Q_{off}+ΔS** (SCALON *et al.*, 2002).

Outra forma para se determinar a recarga hidráulica é a partir do estudo hídrico de corpos de água superficiais que, de forma geral, depende do tipo de conexão entre o corpo de água superficial e o aquífero. Em regiões tropicais como no caso da UGRHI – PCJ, ocorre a contribuição do aquífero à água superficial. Desta forma, Lerner (1997) apud Scalón *et al.* (2002) descreve este sistema por:

$$R = Q_{up} - Q_{down} + \sum Q_{in} - \sum Q_{out} - E_a - \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (7)$$

Onde, **R** é a taxa de recarga, **Q_{up}** e **Q_{down}** são os fluxos do corpo hídrico superficial principal a montante e a jusante, respectivamente, **Q_{in}** e **Q_{out}** os fluxos internos dos rios tributários ao longo do corpo principal, **E_a** é a evapotranspiração superficial ou do leito do rio, **ΔS** é a mudança no armazenamento do canal ou da zona não saturada em variação do tempo **Δt**.

Mesmo assim, as estruturas do solo próximas à superfície interferem diretamente na dinâmica de infiltração na zona vadosa. Tipicamente, a superfície é um meio sedimentar heterogêneo, com sistemas complexos de gretas, rachaduras, concreções, bioatividade e processos geológicos passados e atuantes, acarretando em variações e anomalias dificilmente mensuráveis. Apesar de muitas décadas de estudo, o conhecimento a respeito da relação física solo-água, particularmente próximo à superfície é imperfeito (GUYMON, 1994).

As variações espaciais da recarga em zonas de fluxo preferencial dentro da zona vadosa tratam-se de um assunto crítico para o transporte de contaminantes na estimativa da vulnerabilidade à contaminação de um aquífero. As regiões de fluxo preferencial são muito mais importantes para contaminantes que excedem os padrões de saúde aceitos na proporção de partes por bilhão (ppb), do que em partes por milhão (ppm) (STEENHUIS e PARLANGE, 1991 apud SCALON *et al.*, 2002).

12. CARGAS POLUIDORAS E RISCO DE POLUIÇÃO

O conceito de poluição das águas deve associar o uso à qualidade. Assim, pode-se definir poluição das águas como “*a alteração de suas características físicas, químicas ou biológicas, que prejudicam um ou mais de seus usos pré-estabelecidos: abastecimento público, abastecimento industrial, atividades agropastoris, preservação da fauna e flora, recreação, geração de energia elétrica, navegação, diluição e transporte de efluentes*” (BASSOI e GUAZELLI, 2004).

Contudo, o risco à vulnerabilidade de aquíferos elaborado por Foster e Hirata (1998), determina que a contaminação dos aquíferos em qualquer ponto pode ser estimado pela interação entre:

- a carga contaminante sub-superficial que é, será ou poderá ser aplicada no subsolo como resultado das atividades humanas e
- a vulnerabilidade do aquífero à contaminação depende das condições naturais dos estratos que separam o mesmo da superfície do terreno.

O estudo de vulnerabilidade e risco de poluição se restringe à avaliação dos perigos de contaminação e não considera os impactos potenciais na população humana, ou nos sistemas aquáticos dependentes dos aquíferos, tampouco se refere aos problemas de conotação econômica dos recursos hídricos subterrâneos (FOSTER *et al.*, 2002).

Deste modo, foram levantadas neste estudo as principais características sobre as potenciais cargas contaminantes existentes na UGRHI PCJ, que inclui ocupação urbana por resíduos domésticos e saneamento básico, áreas agrícolas, atividades industriais e comerciais.

Contudo, esses dados serviram para o levantamento de características quantitativas em que se encontra a UGRHI PCJ e, em nenhum momento contém as causas e localizações reais das potenciais fontes e cargas de contaminação, nem o volume ou características específicas do potencial impacto da água subterrânea.

Silva (2004) esclarece que a noção de risco está ligada à idéia de ameaça, no sentido de que um evento indesejável e danoso venha a ocorrer com determinada probabilidade. Analogamente, o perigo é a ameaça em si, ainda não mensurável e não totalmente evidente. Assim sendo, os riscos podem ser classificados a partir da natureza de seus agentes (químicos, biológicos, físicos e psico-sociais), de sua fonte geradora e ao tipo de perigo associado. Apesar disso todos os conceitos de risco têm um elemento comum: a distinção entre realidade e a possibilidade.

O gerenciamento de riscos ambientais é precedido por uma série de processos de avaliação das conseqüências de eventos potencialmente capazes de causar impactos na saúde pública e meio ambiente. Tais conseqüências podem ter diversos danos, que se tornam presentes em cada cenário de estudo, a curto, médio e longo prazo. Juntando-se a probabilidade de ocorrência à magnitude do dano de um determinado

evento indesejável, podem-se conceituar os riscos associados em três níveis possíveis:

- *negligenciáveis*: probabilidades e magnitudes de pequena monta;
- *gerenciáveis*: probabilidades e magnitudes controláveis, de maneira a serem aceitas pela comunidade;
- *não-toleráveis*: probabilidades e magnitudes que, uma vez associadas, não são aceitáveis e exigem ações que as minimizem.

Risco e o uso do termo risco ambiental adotados por Silva (2004), condiz com a utilização da expressão “risco de poluição de aquíferos” onde, risco foi definido como o “perigo adaptado à escala de impacto” apresentado por Foster, *et al.* (2002).

Dentre as atividades que apresentam maiores riscos de poluição e que, por sua vez, são mais comumente estudadas em estimativas de vulnerabilidade de aquíferos estão: esgotos e resíduos urbanos, aterros e lixões, cemitérios, indústrias, postos de combustível e áreas agrícolas.

12.1. RESÍDUOS URBANOS

O resíduo doméstico de uma área urbanizada é o somatório dos esgotos sanitários residenciais e comerciais, incluindo postos de combustíveis, lava-rápidos, açougues, padarias, laboratórios, farmácias, restaurantes, hospitais e outras atividades que, de alguma forma, geram, além de esgoto tipicamente doméstico, parcelas características daquela atividade específica (BASSOI e GUAZELLI, 2004).

12.1.1. Saneamento Básico

Apesar da vasta utilização da fossa séptica como um sistema natural para disposição de resíduos principalmente domésticos, esta prática é, na verdade, um sério risco para a qualidade da água subterrânea utilizada para consumo humano. A contaminação por compostos orgânicos, inorgânicos e bacteriológicos que migram da fossa séptica ao aquífero subjacente é responsável por diversas patologias e enfermidades em todo o mundo (USEPA, 1986).

Os compostos que podem contaminar a água subterrânea proveniente de uma fossa séptica comercial e urbana são: nitratos, metais pesados como cobre, chumbo ou zinco, tolueno, tricloroetileno, clorofórmio, 1,1,1-tricloroetano e tetracloroetileno (USEPA, 1986); matéria orgânica, microorganismos patogênicos e concentrações de fósforo e nitrogênio (BASSOI e GUAZELLI, 2004).

A USEPA (agência ambiental federal norte americana) assume que uma fossa séptica é uma ferramenta doméstica efetiva no gerenciamento de resíduos, quando propriamente dimensionada, desenhada, instalada e sob manutenção periódica.

Dentre as regras básicas para projetar, construir e operar uma fossa séptica eficiente estão (USEPA, 1986):

- a escolha de um bom solo, que possua uma variação granulométrica homogênea entre argila, silte e areia;
- os efeitos naturais de atenuação e retardamento dos contaminantes deverão ocorrer acima da zona saturada, aonde existem poros secos, cheios de oxigênio;
- o dimensionamento deve ser aplicado com relação intrínseca entre a quantidade de resíduo previsto, em relação ao tipo de solo encontrado e ao tamanho da região disponível para instalação do mesmo e
- a rotina da manutenção, como uma ferramenta crítica para a prevenção de falhas no sistema.

O nitrogênio, e todas suas variações, é o poluente mais comumente encontrado nos casos de impacto ambiental tanto no solo quanto na água subterrânea. Sua presença está relacionada principalmente a sistemas de saneamento básico ineficiente ou inexistente.

A série nitrogenada é constituída a partir da energia livre de Gibbs de formação das seguintes espécies: NO_3^- , NH_4^+ , NH_3 e N_2 , podendo ocorrer fases intermediárias como: NO_2^- , NO e N_2O . O nitrato, produto final da nitrificação, somente é estável próximo ao limite superior de estabilidade da água. O campo de estabilidade do amônio, por sua vez, ocorre próximo ao limite inferior de estabilidade (VARNIER, 2001).

No Parque Ecológico do Tietê – Engenheiro Goulart, zona leste do Município de São Paulo, Varnier (2001) apresentou a aplicação de diversos métodos diretos e indiretos

para o mapeamento da pluma de contaminação de nitratos. Neste estudo a autora apresentou dados que indicaram uma grande variação das concentrações da série nitrogenada e demais parâmetros físico-químicos com o tempo e para o mesmo ponto amostrado; a recarga na região é bastante dinâmica, resultado das condições de alta umidade do solo e níveis estáticos rasos; as diferentes condutividades hidráulicas, influenciando diretamente sobre as oscilações do nível estático e transporte de contaminantes, promoveram alterações nas concentrações de nitrato assim como de cloreto e amônio ao longo dos diferentes períodos de amostragem e análise.

Logo, a localização das cidades com grandes concentrações urbanas é muito importante para a definição das metas de proteção das fontes de água, assim como do controle e da identificação das áreas contaminadas. Os censos demográficos e uso das águas do IBGE e do Comitê PCJ, respectivamente, produzem informações imprescindíveis para a definição dessas metas e podem ser essenciais para determinar uma série de tomadas de decisões para a obtenção de investimentos, e prioridades na gestão dos recursos hídricos.

12.2. REGIÕES AGRÍCOLAS

As regiões agrícolas, principalmente aquelas sujeitas à monocultura e plantio extensivo, por reduzirem a capacidade de retenção do solo, fazem com que poluentes oriundos de fertilizantes, adubos, efluentes e pesticidas, como metais pesados, nitratos e outros íons móveis, apresentem altas concentrações que acarretam em um elevado índice de risco de poluição da água subterrânea.

Segundo Foster *et al.* (1993), a super-irrigação em sistemas de irrigação ineficientes pode causar grandes incrementos no nível freático e resultar na salinização do solo e da água subterrânea que provém da evapotranspiração freática direta. Do mesmo modo, cenários hidrogeológicos onde as águas subterrâneas são pouco profundas e solos com textura grossa, com baixo conteúdo de matéria orgânica, tais como calcários costeiros e areias de alguns depósitos aluvionares, podem se mostrar vulneráveis à lixiviação de certos pesticidas.

Este tipo de cenário foi foco de estudo de uma série de profissionais tanto da área ambiental como hidrogeologia e agronomia. Um exemplo prático é o estudo desenvolvido por Soper em 2006 que, por meio de sistemas de informação geográfica, adotou o modelo DRASTIC (ALLER *et al.*, 1987 *apud* SOPER, 2006) direcionado especificamente a agro-químicos, obtendo um mapa de vulnerabilidade específico em

escala 1:25.000. Essa metodologia mostrou-se aplicável e praticável em regiões agrícolas em geral, para um estudo de controle e proteção da água subterrânea.

12.3. ATIVIDADES INDUSTRIAIS

Outra importante fonte de contaminação da água subterrânea, a ser destacado principalmente no Estado de São Paulo, é a atividade industrial. Tanto em países desenvolvidos quanto em países em desenvolvimento, a preocupação ambiental assim como a contaminação da água subterrânea, é um assunto que está há relativamente pouco tempo em pauta nas decisões tomadas pelos acionistas e técnicos.

A Tabela 5 apresenta os principais produtos e resíduos industriais distribuídos de acordo com os ramos de atividades industriais apresentados nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 5: Principais produtos e poluentes por ramos de atividades industriais localizados na UGRHI-PCJ (compilado de SHEREVE e BRINK, 1980 e IG, CETESB e DAEE, 1997)

| RAMOS DE ATIVIDADES INDUSTRIAIS | PRINCIPAIS PRODUTOS | PRINCIPAIS POLUENTES |
|----------------------------------|---|--|
| ALIMENTÍCIA | Óleo comestível, margarina, manteiga, Ácidos Graxos, Ração Animal, Margarina | Óleos, Surfactantes, Soda Cáustica, Sulfatos |
| AUTOMOTIVA E ACESSÓRIOS | automóveis, tratores, acessórios, equipamentos | Metais, COV e COSV (TPH, BTEX, PAHs), Solventes Halogenados, Metais (Ni, Cd, Cr VI, Pb, Sb, Sn, Cu), Cianetos |
| BORRACHA | borrachas e derivados | COV e COSV, Sulfatos e Sulfetos, Telúrio, Selênio, Metais (Zn, Pb, Ti), Aminas, Ftalatos, e Fluoretos |
| CURTUME | tratamento de couro | Cromo VI, Manganês e Sulfeto |
| GRÁFICA | Agentes reveladores, ativadores, preservativos, inibidores, precipitantes do cálcio, agentes molhadores, neutralizador, fixadores, endurecedores, intensificadores, redutores e filmes | Metais (Ag, Hg,) Iodeto, Brometo, Cloreto, Fosfatos, Enxofre, Nitrogênio |
| MADEIRA, PAPEL E CELULOSE | Papel, papelão, celulose, tratamento de madeira | Metais pesados, Soda Cáustica, Organoclorados, Licor Negro |
| MEDICAMENTOS | Remédios para uso humano e animal e equipamentos | Metais, Surfactantes, Soda Cáustica, Óleos e Graxas, Série Nitrogenada, Fosfatos e Enxofre |
| METALURGIA E EQUIPAMENTOS | Metalurgia pesada, fabricação de equipamentos para indústrias, fundição. | Óleos, Graxa, Metais, Fluoreto, Fenóis, Soda Cáustica, COV |
| PLÁSTICOS | Plásticos | Metais Pesados (Cr VI, Cd, Pb, Ti) Enxofre e Corantes |
| QUÍMICA | Baterias e Acumuladores | Sulfatos, Acido Sulfúrico, Borrax Ácidas, Metais (Pb, Mn, Cd, Ni, Li, Hg, Zn) |
| | Compostos inorgânicos | Amônia, Cloretos, Cal, Organoclorados, Soda Cáustica, Mercúrio |
| | Bromo, Iodo, Flúor, sais de metais | Metais Pesados, Sulfetos e Sulfatos, Fluoretos, Cloretos e Brometos |
| | Defensivos agrícolas | DDT, BHC, Metais (Pb, As, Mn), Fluoreto, Organoclorados, Organofosforados, Aldrins, Lindano, Malations e Paration |
| | Fertilizantes | Série Nitrogenada, Metais, Ácidos, Fluoreto, Pentóxido de Vanádio, Fosfogesso, Borra de Enxofre |
| | Higiene e cosmética | Mo, Mn, Nitrogenados |
| | Limpeza, desengraxantes | Surfactantes, Sulfatos, Cloretos, Série Nitrogenada, Fosfatos, Organoclorados, Benzeno, Óleos Graxos |
| | Resinas, Tintas e Vernizes | Metais, Fenóis, COV e COSV, Organoclorados e Organosfosforados |
| REFINARIAS | Produtos orgânicos, metanol, formaldeído, acetatos, fibras, borrachas, estireno, fenol cetonas, plásticos, solventes clorados, aCr VIilatos, plastificantes, adesivos, intermediários orgânicos, gás liquefeito de refinaria, gasolina acabada, combustíveis, Uréia, Fertilizantes Nitrogenados | HC Alifáticos, HC Aromáticos, Sulfatos, Sulfetos, Enxofre, Ftalatos, Aminas, Cloretos, Organoclorados, Metais e Cianeto. |
| TEXTIL | Roupas, acessórios, calçados, fabricação de fibras naturais e sintéticas | Metais, COV e COSV e Óleos Graxos |

Comparando a tabela acima, com os resultados apresentados no Capítulo 9, os potenciais contaminantes que podem vir a ocorrer com maior frequência dentro da UGRHI-PCJ, condicionados pelo número de ocorrência das atividades industriais de

metalúrgica, alimentos, química e plásticos, são: óleos, graxa, fluoreto, fenóis, soda cáustica, compostos orgânicos voláteis, surfactantes, sulfatos, ácido sulfúrico, borras ácidas, metais (Cr VI, Ti, Pb, Mn, Cd, Ni, Li, Hg, Zn), amônia, cloretos, cal, organoclorados, mercúrio, DDT, BHC, organofosforados, aldrins, lindano, malations, paration, série nitrogenada, pentóxido de vanádio, fosfogesso, borra de enxofre e cloretos.

13. SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA

Qualquer dado que possua um componente espacial pode ser manuseado, armazenado e analisado por um Sistema de Informação Geográfica – SIG. É importante salientar que um SIG é utilizado mais corretamente como uma extensão do pensamento analítico. Assim como o campo do conhecimento da estatística, esse sistema é somente uma ferramenta auxiliar para descrever e inferir; ele deve ser usado após o problema ambiental ter sido cuidadosamente delimitado, para então se verificar as possibilidades de solução. Tecnicamente um SIG pode ser considerado como uma caixa de ferramentas digital para coleta, armazenamento, busca, análise, transformação e exposição de dados espaciais (SILVA, 2004).

Nesse estudo, o uso do SIG foi focado para a obtenção, georreferenciamento, vetorização, e cruzamento de dados para a elaboração de 2 (dois) mapas de vulnerabilidade da UGRHI-PCJ em escala 1:1.000.000 e posterior comparação entre esses.

O software utilizado como ferramentas para análise de SIG na dissertação foi o ARCGIS versão 9.2 da ESRI, aplicando as extensões ARCMAP, ARCVIEW, ARCCATALOG e ARCTOOLBOX utilizando como planilha para gerenciamento de dados o MS Access 2003. Destes, foram aplicados:

- digitalização e aquisição de imagem;
- bases de dados espacial e atributos;
- georreferenciamento e criação de rasters;
- conversão de formatos (raster para GRID, GRDI para vetor, ASCII para Raster);
- ferramentas para vetorização;
- atribuição de parâmetros e valores;

- sistemas de análise geográfica;
- ferramentas para análises estatísticas e geoestatística (ESRI, 2001);
- álgebra de mapas;
- criação de superfícies a partir de imagens tipo *raster* e
- sistema de exposição cartográfica.

14. GEOESTATÍSTICA

O uso de ferramentas geoestatísticas será realizado com duas finalidades: a primeira será a interpolação por Krigagem Residual das imagens SRTM90 (*Shuttle Radar Topography Mission* - JARVIS et al, 2006) de elevação digital e, a segunda, será a aplicação da Análise de Regressão Múltipla seguida por Krigagem com Deriva Externa para elaboração do mapa pluviométrico.

14.1. KRIGAGEM RESIDUAL

Neuman e Jacobson (1984) testaram a krigagem residual como uma ferramenta geoestatística voltada para estimativa de gradientes hidráulicos regionais. Utilizando resíduos da superfície de tendência obtida por solução dos mínimos quadrados, este processo elimina a deriva natural dos dados e gera um semivariograma estacionário.

O resíduo de um universo amostral pode ser definido como uma função linear de coordenadas geográficas de um conjunto de observações, construída de tal forma que as distâncias entre o valor amostrado e sua representação na função linear é a menor possível (DAVIS, 1973).

A krigagem residual faz uso de $\hat{\gamma}^R$ (semi-variância dos resíduos) ao invés de γ^R (semi-variância amostral). Na prática, dados de elevação geram um semivariograma não estacionário, ou seja, sem variância espacial finita. Esta característica provém da vergência natural dos dados, que reflete uma tendência regional intrínseca aos mesmos.

Para obter o resíduo utiliza-se da iteração por regressão onde, considera-se Z como o vetor de $Z(\mathbf{x})$ medidos em I locais, onde $X_{i,j}=1,2,3,\dots,I$, μ como o correspondente vetor de deriva e R como o vetor dos resíduos em x_i , deste modo pode-se escrever:

$$Z = \mu + R \quad (8)$$

Se R é relativamente constante e $\gamma_R(s)$ é conhecido, o i -ésimo termo (i,j) da variável V , pode ser estimado como:

$$V_{i,j} = \rho R(S_{i,j}) = \rho R(0) - \gamma_R(S_{i,j}) \quad (9)$$

Onde S é o vetor de deslocamento $|S|$ e V é a variável aleatória, ρR a covariância de $R(x)$. Como inicialmente o $\gamma_R(s)$ e V são desconhecidos, Neuman e Jacobson (1984) subdividiram em duas fases para a determinação dessas incógnitas.

Na primeira etapa, considera-se o resíduo como não correlacionável (não estacionáveis), e V é substituído pela matrix identidade I . Assim, procede-se com a estimativa do semivariograma de $\hat{\gamma}_R(s)$. Utiliza-se uma superfície de tendência dada por solução dos mínimos quadrados dos valores amostrados. Inicialmente aplica-se um polinômio de grau 1 (p) para obter o resíduo de cada ponto, \hat{R} .

Se $\hat{\gamma}_R(s)$ apresentar um patamar definido passa-se para a segunda etapa, de modo contrário incrementa-se p em 1, e repete-se o procedimento até obter as características de $\hat{\gamma}_R(s)$ acima citadas.

A segunda etapa inicia-se com o cálculo de \hat{V} a partir de:

$$\hat{V}_{i,j} = \rho \hat{R}(0) - \hat{\gamma}_R(S_{i,j}) \quad (10)$$

Ao substituir V por \hat{V} faz-se o cálculo de \hat{R} e, por consequência, obtém-se $\hat{\gamma}_R(s)$ gerando um novo \hat{V} . Este processo de iteração continua até o momento em que $\hat{\mu}$ e $\hat{\gamma}_R(s)$ adquirem valores estáveis.

Comparando-se os resultados obtidos na análise geoestatística convencional àqueles obtidos na análise geoestatística dos resíduos observa-se que a diferença entre os dois reside apenas na natureza dos dados; enquanto a primeira utiliza os dados brutos, a última utiliza da diferença entre a variável “in natura” e uma superfície de tendência polinomial de baixo grau, ou seja, o resíduo. Assim sendo, o procedimento matemático da estimativa por krigagem ordinária e da krigagem residual é absolutamente o mesmo.

A aplicação da krigagem residual, segundo Lourenço (2005), mostrou-se adequada para a estimativa da potenciometria do reservatório de Três Irmãos em Pereira Barreto, São Paulo. Nesse caso, foram comparados o mapa potenciométrico elaborado manualmente, com os mapas potenciométricos obtidos por krigagem ordinária e krigagem residual para superfícies polinomiais de grau 1 e de grau 2. O estudo indicou que o resultado mais próximo ao mapa elaborado manualmente foi o obtido por krigagem residual com polinômio de grau 1, mesmo tendo o polinômio de grau 2 apresentado melhor ajuste com menores resíduos.

14.1.1. Imagem SRTM

A krigagem residual será utilizada para a elaboração do mapa topográfico da UGRHI PCJ, utilizando os dados de elevação topográfica disponibilizados pelo *Shuttle Radar Topography Mission* (“SRTM”) (JARVIS et al, 2006).

O *Shuttle Radar Topography Mission* foi um programa espacial Norte Americano que, no ano de 2000, lançou ao espaço um satélite que durante 3 dias orbitando ao redor do planeta, fez o levantamento dos dados de elevação dos continentes. Esse levantamento foi feito a cada 1 arc segundo (30 metros) nos Estados Unidos da América e a cada 3 arc segundos (90 metros) para o resto do mundo, sendo seu resultado disponível para *download* gratuitamente.

Seu produto é conhecido como imagem SRTM, em suma pode ser considerado como um MDE (Modelo de Elevação Digital) com cobertura de 90% das áreas continentais do planeta e, atualmente, encontra-se em sua 3ª edição para retirada dos picos negativos e melhoria na união das imagens.

As imagens SRTM90 possuem precisão de 20 metros em X e Y e de 16 m em Z. A aplicação da krigagem residual garantirá a suavização das curvas, gerando uma superfície topográfica com dados a cada 45 metros ou, metade da escala original.

Da mesma forma, Valeriano (2004) fez uso da Krigagem Residual para a interpolação de dados de elevação oriundos das imagens SRTM disponíveis para a América do Sul. Nesse estudo, assim como proposto por Neuman e Jacobson (1984) o autor utiliza da solução dos mínimos quadrados com superfície polinomial de grau 1.

A Krigagem Residual será realizada utilizando o software ARCGIS 9.2 com base na ferramenta “*geostatistical analysis*” (ESRI, 2001) e, seu resultado será utilizado como variável independente para a realização da análise de regressão múltipla.

14.2. ANÁLISE DE REGRESSÃO MÚLTIPLA

A regressão múltipla é uma maneira de testar dependências cumulativas de uma única variável dependente em relação às diversas variáveis independentes. Cada variável independente é isolada e mantida constante enquanto as variáveis restantes variam sistematicamente sendo observados os seus efeitos sobre a variável dependente. A variável a ser inicialmente mantida constante é aquela que ocasiona a maior influência na variabilidade da variável dependente.

Desta forma temos que, segundo a regressão linear:

$$Y = b_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_nX_n + e_n \quad (11)$$

Sendo **Y** a variável dependente, **b₀** o deslocamento da reta sobre a origem, **a** o ângulo de inclinação da reta, **X₁** a variável independente da maior influência, **X_n** a variável independente de menor influência e **e_n** o erro da enésima independente sendo **e_n < e₁** (erro da variável **X₁**) (LANDIM, 1985 e DAVIS, 1973).

Essa equação polinomial pode ser resolvida segundo Lourenço e Landim (2004) pela resolução da seguinte matriz:

$$\begin{bmatrix} n & \sum x_{1i} & \sum x_{ni} \\ \sum x_{1i} & \sum x_{1i}^2 & \sum x_{1i}x_{ni} \\ \sum x_{ni} & \sum x_{ni}x_{1i} & \sum x_{ni}^2 \end{bmatrix} \begin{matrix} [X] \\ [A] \end{matrix} * \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{matrix} [Y] \\ [Y] \end{matrix} \quad (12)$$

Kravchenko et al (1996) aplicaram a análise de regressão múltipla para elaborar o mapa pluviométrico do Estado de Wyoming - EUA, utilizando dados de topografia, coordenadas geográficas, log da inclinação e cobertura vegetal como variáveis independentes e, a média da pluviometria anual como variável dependente. Após obter os valores de correlação entre cada variável independente e a variável dependente, os autores interpolaram os valores obtidos utilizando tanto a Krigagem Ordinária quanto a Krigagem com Deriva Externa.

Como resultado, os autores definiram que, em Wyoming, Estados Unidos da América, a variável de maior influência na pluviometria é a altitude, seguida pelo log da inclinação. O uso da Krigagem com Deriva Externa produziu melhores resultados na validação cruzada em comparação à Krigagem Ordinária.

Com mesmo enfoque que Kravchenko et al (1996), esse estudo utilizará a análise de regressão múltipla seguida pela Krigagem com Deriva Externa, para interpolação dos valores de pluviometria média anual da UGRH-PCJ, utilizando como variáveis independentes as coordenadas norte e leste, altitude e log da inclinação, sendo esses dados retirados dos locais onde existem postos de medição pluviométrica do DAEE.

A análise de regressão múltipla será feita utilizando o software MS Excel utilizando a ferramenta “análise de dados”. A Krigagem com Deriva Externa será realizada utilizando o software ISATIS e, os valores de saída exportados para o software ARCGIS 9.2 para posterior processamento.

O objetivo é obter um mapa pluviométrico a ser utilizado como o quarto parâmetro do modelo GOD, a ser chamado a partir de então de modelo GODP.

14.3. Krigagem com Deriva Externa (KDE)

A krigagem com deriva externa é aplicada no caso em que a variável principal apresenta uma relação de dependência de uma variável auxiliar externa, e a variável aleatória a ser estimada, utiliza variáveis auxiliares para estimar um modelo de tendência. Essas variáveis devem ser conhecidas em todo o domínio onde será estimada a variável principal.

De acordo com Deutsch e Journel (1998) a KDE é uma extensão da Krigagem com Tendência. Segundo Soares (2000) na KDE a tendência é modelada como função linear de variáveis auxiliares externas.

$$m(x) = a_0(x) + a_1(x)y(x) \quad (13)$$

Sendo os coeficientes a_0 e a_1 estimados juntos com $Z(\mathbf{x}_\alpha)$ e a deriva $m(\mathbf{x}_0)$ assume o valor da variável $Y(\mathbf{x}_0)$, sendo o estimador em \mathbf{x}_0 definido à custa de n amostras vizinhas por:

$$[Z_{KDE}(\mathbf{x}_0)] = \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha}^{KDE} Z(\mathbf{x}_{\alpha}) \quad (14)$$

A KDE utiliza informações das variáveis auxiliares, que devem ter sido amostradas ou previamente estimadas em todos os pontos a serem estimados, para criar um modelo de tendência. Para tanto é necessário existir uma relação de dependência entre a variável auxiliar e a variável principal (Deutsch e Journel,1998).

Nesse estudo a variável principal será o índice pluviométrico médio anual, enquanto a variável auxiliar será o resíduo obtido a partir da análise de regressão múltipla, segundo a metodologia proposta por Kravchenko et al (1996).

15. MAPA DE VULNERABILIDADE

Para a elaboração do mapa de vulnerabilidade, como já citado anteriormente, foram utilizados como fonte de dados para a aplicação dos índices **G** (confinamento da água subterrânea), o Mapa das Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo (DAEE, IG, IPT e CPRM, 2005), Sistema de Projeção South American Datum 1969 escala 1:1.000.000. O índice **D** (profundidade da água subterrânea) foi uma compilação de informações contidas em DAEE, IG, IPT e CPRM (2005); IG (1997) e IRRIGART (2005).

A Tabela 6 a seguir apresenta o resumo dos índices **G** e **D** assim como o produto entre esses (**G x D**), indicando assim os valores adotados para cada parâmetro:

Tabela 6: Índice de vulnerabilidade adotado por tipo de confinamento da água subterrânea e profundidade (n.a.) da água subterrânea.

| AQUÍFERO | TIPO DE CONFINAMENTO | ÍNDICE CONFINAMENTO (G) | N.A. | ÍNDICE N.A. (D) | G x D |
|---------------------------|--|-------------------------|-----------|-----------------|-------|
| Pré-Cambriano | Livre e Livre coberto | 0,8 | 10 a 30 m | 0,8 | 0,64 |
| Serra Geral (Basalto) | Livre a Semi-Confinado | 0,5 | 20 a 50 m | 1,0* | 0,5 |
| Serra Geral (Diabásio) | Semi-Confinado podendo servir como barreira hidráulica | 0,4 | >50 m | 0,6 | 0,24 |
| Guaraní (área de recarga) | livre | 1,0 | <10 m | 0,9 | 0,9 |
| Tubarão | Livre a semi-confinado | 0,5 | 15 a 40 m | 0,8 | 0,4 |
| Passa-Dois | Confinado | 0,2 | ** | 0,6 | 0,12 |

* qualquer profundidade **sem registro

Avaliando a Tabela 6, o Aquífero Guarani é o único que apresenta **G x D** igual a 0,9. Por sua vez, o aquíclude Passa-Dois, como é de se esperar, apresenta o menor

produto entre esses índices, sendo seu valor igual a 0,12 seguido pelo diabásio da Formação Serra Geral com 0,2.

O mapa geológico utilizado para a inserção do parâmetro **O** (zona vadosa) foi a Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo (CPRM, 2004), folhas SF-22 e SF-23, escala 1:1.000.000, projeção cartográfica cônica conforme Lambert e sistema geodésio de referência *South American Datum-SAD 69*.

Ao todo foram diferenciadas 17 principais unidades litológicas presentes, distribuídas entre rochas ígneas, metamórficas, vulcânicas e sedimentares consolidadas e não consolidadas. A Tabela 7 apresenta a distribuição dessas litologias, incluindo classificação e descrição litológica e índice adotado segundo o parâmetro de zona vadosa (**O**) para o modelo GOD.

Tabela 7: Índice de vulnerabilidade adotado para zona vadosa

| UNIDADE | LITOTIPOS PRINCIPAIS | ÍNDICE ZONA VADOSA (O) |
|--------------------------|--|-------------------------------|
| Embasamento Cristalino | granitos e granulitos, gnaisses, charnokitos e rochas intrusivas do embasamento cristalino | 0,6 |
| Grupo Andrelândia | quartzitos e metagrauvas | 0,7 |
| Grupo Serra do Itabera | quartzitos, meta pelitos e micaxisto | 0,7 |
| Grupo São Roque | meta arenitos quartzoso | 0,7 |
| Fm. Itararé | arenitos e diamictitos | 0,7 |
| Fm. Tatuí | siltitos | 0,6 |
| Fm. Teresina | siltito argiloso e argilitos | 0,6 |
| Fm. Irati | calcário e folhelhos | 0,8 |
| Fm. Pirambóia | folhelhos, arenitos e areno-siltitos | 0,6 |
| Fm. Corumbataí | arenitos e siltitos | 0,7 |
| Fm. Botucatu | arenitos e quartzos arenitos | 0,7 |
| Fm. Serra Geral | dacito e diabásio | 0,8 |
| Fm. Itaquerí | arenitos e arenitos conglomeráticos | 0,7 |
| Fm. Rio Claro | cascalho e areias | 0,8 |
| Dep. Detrito Lateríticos | areias, cascalhos e argilas | 0,7 |
| Dep. Coluvionares | areia e argila | 0,6 |
| Dep. Aluvionar | areias e cascalhos | 0,7 |

A Figura 6 indica de forma didática a distribuição dos índices adotados de acordo com o apresentado nas Tabelas 6 e 7, para os parâmetros **G O D** dentro da UGRHI-PCJ.

15.1.1. Cruzamento de Mapas

Após a inserção dos índices supracitados nas Tabelas 6 e 7, em seus respectivos *shapefiles* como apresentado na Figura 6, foi então desenvolvido o procedimento de “map algebra” (álgebra de mapas) para obter o produto do cruzamento dos 3 parâmetros adotados pelo modelo GOD.

Em **Anexo – Mapa 3** está apresentado o: Mapa de Vulnerabilidade das Águas Subterrâneas da UGRHI-PCJ Utilizando o Modelo GOD, produto desse cruzamento de informações.

15.1.2. Interpretação

A primeira observação a ser destacada é a feição geral do mapa, podendo se afirmar que os parâmetros **G** e **D** definiram a aparência geral do mapa, sendo o parâmetro **O** de menor influência na distribuição de seus índices, já que o mesmo variou somente entre 0,6 e 0,8, como é possível observar na Figura 6.

A região que compreende o embasamento cristalino, localizado na porção oeste da UGRHI possui uma vulnerabilidade média à contaminação da água subterrânea, contudo, tal afirmação não pode ser considerada como definitiva devido a diversos fatores, como a significativa alteração do nível da água subterrânea nas fraturas, zonas de fluxo preferencial dentro da própria zona vadosa e diferentes materiais de preenchimento das fraturas, além da quantidade e qualidade das informações disponíveis. Contudo, um índice médio pode ser considerado como “previsível” dentro do cenário conhecido.

O aquífero Tubarão apresenta um índice de vulnerabilidade baixo devido à granulometria fina de suas rochas e a profundidade da água subterrânea. Dentro dessa macro região existem porções de média vulnerabilidade representadas pelas intrusões de diabásio da Formação Serra Geral.

O aquífero Serra Geral, tanto em sua porção intrusiva (diabásio) como na descontínua (basalto), apresenta uma vulnerabilidade média à contaminação da água subterrânea. Contudo, devido à diferença sutil entre os mapas utilizados, parte da Formação Serra Geral descontínua apresentou uma vulnerabilidade extrema devido à ocorrência da litologia (**O**) sobre o confinamento livre (**G**) do aquífero Guarani, como é possível observar na porção oeste dos Mapas 1 e 2, ocasionado pela discrepância de informações entre os mapas.

O aquíclode Passa-Dois, como seria de se esperar, apresentou uma vulnerabilidade desprezível à contaminação da água subterrânea.

Por último, o aquífero Guarani apresentou uma vulnerabilidade alta devido tanto à sua litologia arenosa, quanto ao confinamento livre da água subterrânea e a profundidade da mesma, já que nessa UGRHI o aquífero Guarani ocorre em sua porção aflorante (Formações Pirambóia e Corumbataí).

Sendo assim, como comentário de estratégia e planejamento para preservação do recurso hídrico subterrâneo, deve-se atribuir uma maior atenção quanto aos perímetros de proteção das águas subterrâneas nas sub-bacias hidrográficas Piracicaba e Corumbataí, na porção em que ocorrem os aquíferos Guarani e Serra Geral. Quanto às outras bacias e sub-bacias hidrográficas, uma atenção especial deverá ser dada nas regiões onde ocorre o aquífero Serra Geral, assim como o aquífero cristalino do embasamento.

16. PROPOSTA DO MODELO GODP

Estudos diversos têm mostrado que a estimativa da recarga em grandes áreas pode ser obtida com parâmetros facilmente coletados em campo, sem ter de considerar as complicações das variabilidades locais. Os métodos incluem a determinação do fluxo regional por datação isotópica, cálculo de balanço de massa de cloreto, modelagem com traçadores, modelagem de fluxo pela Lei de Darcy, medidas diretas de pluviometria e variações do nível freático (SCALON et al, 2002).

O Modelo GOD, como visto anteriormente, não utiliza o parâmetro de recarga / pluviometria na estimativa de vulnerabilidade, já que este parâmetro pode ser influenciado diretamente a fatores como uso e ocupação do solo, zonas de tendência de fluxo, tipos de contaminantes e contaminações associadas.

Nesse capítulo pretende-se inserir ao modelo GOD um quarto parâmetro de influência direta para a estimativa da vulnerabilidade à contaminação da água subterrânea, que é a *pluviometria*.

Contudo, a utilização do índice pluviométrico dentro do modelo GOD não poderá ser realizado indiscriminadamente e em qualquer escala ou para qualquer objetivo, devendo ser respeitadas as seguintes premissas:

- aplicável somente na elaboração de mapas em escala <1:250.000, ou escalas em que não é possível a determinação do uso e ocupação do solo, tipo de contaminação, assim como para fins de definição de perímetros de proteção;
- aplicável com maior significado para a comparação entre regiões geológica e hidrogeologicamente semelhantes, contudo, distantes geograficamente uma da outra;
- a utilização da pluviometria ao invés da recarga mostra-se justificável por ser um parâmetro de fácil obtenção, entretanto, caso a área estudada possua o índice de recarga pré-determinado, esse deverá ser usado,;
- as variações decorrentes principalmente da evapotranspiração e regiões de fluxo preferencial não devem ser consideradas, já que a escala de trabalho reduzida não possibilita tais estimativas e
- as variações sazonais não deverão ser consideradas devido ao grau de imprecisão que o modelo está sujeito, sendo assim, o índice de precipitação médio anual (i.p.m.a.) deverá ser adotado.

Para a elaboração do mapa de vulnerabilidade utilizando o modelo GODP, os índices de pluviometria que restringem a pluviometria estão entre 0 e >2000 mm/ano sendo 0 (região desértica) o menor peso e >2000 o maior peso (região tropical).

Foram realizadas três tentativas para o estabelecimento do índice P, para as faixas do i.p.m.a., com seus valores apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Índices testados para a elaboração do GODP

| Pluviometria (mm/ano) | P | Pluviometria (mm/ano) | P' | +P |
|-----------------------|-----|-----------------------|-----|------|
| < 600 | 0,6 | <1000 | 0,5 | +0,0 |
| 601 a 1200 | 0,7 | 1001 a 1500 | 0,7 | +0,1 |
| 1201 a 1600 | 0,8 | 1501 a 2000 | 0,9 | +0,2 |
| 1601 a 2000 | 0,9 | >2001 | 1,0 | +0,3 |
| > 2000 | 1,0 | | | |

Tanto o teste P quanto o teste P' mantiveram o sistema paramétrico original, ou seja resultado do modelo GODP é o produto de seus índices (1). Contudo, o teste +P é o acréscimo do índice P ao resultado do produto dos parâmetros GOD.

16.1. APLICAÇÃO GEOESTATÍSTICA

A seguir serão apresentadas as duas aplicações geoestatísticas realizadas nesse estudo para a elaboração do mapa GODP.

16.1.1. Mapa Topográfico por Krigagem Residual

Como apresentado no capítulo 14, foi realizada a krigagem residual das imagens de radar da topografia da região, conhecida como imagem SRTM90, utilizando o *software* ARCGIS 9.0.

O primeiro passo foi fazer o “download” das 5 imagens SRTM a partir de JARVIS et al. (2006) em formato .ascii, e convertê-las para imagem raster. Em seguida, a fim de reduzir o tempo de processamento das imagens, essas foram cortadas pelo contorno da UGRHI-PCJ. As imagens utilizadas foram:

- srtm_27_17_3_3
- srtm_27_17_3_4
- srtm_27_17_4_3
- srtm_27_17_4_4
- srtm_27_17_5_3

Utilizando a análise geoestatística, selecionando a opção de krigagem residual com uma superfície polinomial de grau 1 para a retirada da tendência, foi calculado o variograma experimental e ajustado o modelo. Considerou-se, pelo resultado da análise geoestatística, o domínio anisotrópico, sendo então ajustado o modelo para duas direções as quais variaram de imagem para imagem.

A Figura 7 apresenta o mapa topográfico da UGRHI-PCJ utilizando a krigagem residual das imagens SRTM assim como os correlogramas que indicam a anisotropia das imagens, e seus respectivos variogramas experimentais e modelos ajustados.

A Tabela 9 apresenta os atributos de cada uma das imagens e os valores ajustados do variograma experimental das mesmas, assim como os parâmetros de vizinhança. Para todas as imagens foram utilizados 20 passos de 90 metros, com tolerância de 50%, raio de busca a 45° com seu cone limitado a 3 passos. Os parâmetros de busca da vizinhança utilizados foi um sistema quadrangular com no máximo de 12 e mínimo de 6 vizinhos e raio de busca definido pelo variograma experimental.

Tabela 9: Parâmetros variográficos ajustados para cada imagem SRTM

| Parâmetros Variográficos | | IMAGEM SRTM | | | | |
|-------------------------------------|----------------------|---------------|-----------|-------------|------------|---------------|
| | | 27_17_3_3 | 27_17_3_4 | 27_17_4_3 | 27_17_4_4 | 27_17_5_3 |
| Nº de Pontos | | 47.370 | 46.156 | 53.819 | 11.660 | 40.849 |
| Efeito Pepita | | 115 | 300 | 350 | 0 | 200 |
| Anisotropia | | geométrica | mista | geométrica | geométrica | geométrica |
| Modelo I (direção principal) | Modelo | exponencial | circular | exponencial | esférico | exponencial |
| | Direção | N92 | N15 | N60 | N140 | N45 |
| | Raio de Busca | 1000m | 900m | 1150m | 500m | 1000m |
| | Patamar | 2100 | 6800 | 3400 | 1310 | 10000 |
| Modelo II | Modelo | pentaesférico | circular | esférico | esférico | pentaesférico |
| | Direção | N182 | N205 | N210 | N230 | N135 |
| | Raio de Busca | 800m | 750m | 950m | 380m | 500m |
| | Patamar | 5500 | 9000 | 3800 | 1500 | 9000 |

A imagem SRTM_27_17_4_3 necessitou de uma superfície de grau 3 para a remoção dos resíduos, a fim de se obter um variograma com o patamar definido.

De acordo com os variogramas experimentais, a direção principal apresentou uma amplitude entre 400 m (SRTM_27_17_3_3 e 3_4) e 900 m (SRTM_27_17_5_3). A direção perpendicular apresentou uma amplitude entre 300 m (SRTM_27_17_4_4) e 650 m (SRTM_27_17_3_4).

Como também foi possível observar, a anisotropia geométrica ocorreu em todas as imagens à exceção da imagem SRTM_27_17_3_4 que apresentou anisotropia mista. O comportamento próximo à origem é do tipo efeito pepita, que variou entre 115 e 300 para todas as imagens, à exceção da imagem SRTM_27_17_4_4 que é linear.

Como resultado, foi elaborado o Mapa Topográfico da UGRHI-PCJ (Figura 7), com 6 faixas de altitudes: <600 , 601 a 900, 901 a 1200, 1201 a 1500, 1501 a 1800 e, 1801 a 2100 metros acima do nível do mar.

Neste mapa é possível observar que existem duas áreas com maior elevação dentro da UGRHI-PCJ: a oeste compreendida pelo alto estrutural ocasionado pela intrusão da Formação Serra Geral e, principalmente, na porção leste, representada pela borda da Serra da Mantiqueira, chegando a quase 2000 metros de altitude no extremo leste.

16.1.2. Mapa Pluviométrico por Análise de Regressão Múltipla

Para a elaboração do mapa pluviométrico foi utilizado o banco de dados pluviométricos do DAEE (www.daae.sp.gov.br), retirando o índice pluviométrico médio anual (i.p.m.a) das estações de medição pluviométricas distribuídas em toda a UGRHI-PCJ, e utilizando-o como variável dependente na análise de regressão múltipla.

Contudo, no banco de dados a localização das estações é fornecida contendo somente as coordenadas geográficas *grau* e *minuto*, desse modo a distribuição das estações acabavam em alguns casos ficando fora da área de estudo devido à ausência do *segundo*, ou muito deslocadas do município onde as mesmas estavam instaladas. Por esse motivo, aquelas estações que ficaram muito fora da área de estudo ou do município foram excluídas do banco de dados, já aquelas que aparentemente estavam próximas de seu município ou limite da UGRHI foram ajustadas manualmente, tendo como critério de proximidade e ajuste seus respectivos i.p.m.a.. Das 106 estações originais, foram descartadas 18 e utilizadas 88. Ao final, suas localizações foram convertidas de SAD-69 (geográfica) para Córrego Alegre 23S (UTM).

A partir da localização das estações pluviométricas, foram retirados da imagem resultante da krigagem residual do mapa topográfico, os dados de altitude e log da inclinação. Dessa forma, obteve-se as variáveis independentes necessárias de acordo com Kravchenko (1996) para a interpolação dos dados de pluviometria utilizando krigagem com deriva externa, a partir dos resíduos resultantes da análise de regressão múltipla do i.p.m.a..

A Tabela 10 indica a localização das estações pluviométricas utilizadas, seguido pelo i.p.m.a., coordenadas UTM Norte e Leste, altitude e log da inclinação.

Tabela 10a: Dados de entrada da análise de regressão múltipla

| Estação Pluviométrica | Variável Dependente | Variáveis Independentes | | | |
|-----------------------|---------------------|-------------------------|-------------|----------|-------------------|
| | i.p.m.a | Leste | Norte | Altitude | Log da Inclinação |
| E4-044 | 1032 | 276048.436 | 7453024.854 | 521 | 1.95419 |
| E3-021 | 1032 | 320423.756 | 7429859.141 | 705 | 1.95420 |
| D4-090 | 1104 | 245785.542 | 7444922.066 | 571 | 1.95421 |
| D4-063 | 1116 | 220863.769 | 7467049.450 | 566 | 1.95419 |
| E4-013 | 1116 | 255908.927 | 7443730.970 | 540 | 1.95421 |
| D4-019 | 1128 | 210069.774 | 7469517.495 | 550 | 1.95365 |
| D4-086 | 1140 | 249212.822 | 7470592.383 | 576 | 1.95417 |
| D7-038 | 1152 | 231686.987 | 7458192.838 | 647 | 1.95419 |
| D4-091 | 1152 | 246719.929 | 7466841.369 | 555 | 1.95416 |
| D4-072 | 1152 | 260863.020 | 7453857.982 | 563 | 1.95413 |
| D4-096 | 1164 | 239757.769 | 7503169.782 | 559 | 1.95412 |
| D4-085 | 1164 | 266769.492 | 7455508.093 | 536 | 1.95420 |
| D3-069 | 1164 | 330342.479 | 7466257.082 | 829 | 1.95422 |
| D4-109 | 1176 | 213225.417 | 7503873.994 | 488 | 1.95419 |
| E4-037 | 1188 | 240647.098 | 7465527.626 | 610 | 1.95420 |
| E4-015 | 1188 | 271537.755 | 7448528.138 | 573 | 1.95419 |
| D4-005 | 1224 | 267970.820 | 7485680.190 | 558 | 1.95412 |
| D4-003 | 1236 | 197613.242 | 7482490.425 | 476 | 1.95420 |
| D4-069 | 1236 | 251676.214 | 7461769.460 | 623 | 1.95419 |
| D4-084 | 1236 | 289550.725 | 7471806.485 | 628 | 1.95417 |
| D4-092 | 1248 | 250034.308 | 7455908.315 | 561 | 1.95418 |
| E3-018 | 1255 | 309404.294 | 7427234.821 | 556 | 1.95420 |
| D4-068 | 1260 | 229272.538 | 7471054.343 | 625 | 1.95420 |
| D4-081 | 1260 | 236663.780 | 7473931.173 | 544 | 1.95417 |
| D4-049 | 1272 | 193280.317 | 7469977.884 | 487 | 1.95371 |
| D7-036 | 1272 | 244620.000 | 7475398.000 | 637 | 1.95418 |
| D4-011 | 1272 | 288023.723 | 7481533.083 | 589 | 1.95416 |
| D4-102 | 1284 | 209224.900 | 7477708.016 | 538 | 1.95419 |
| D4-056 | 1284 | 216643.000 | 7496423.000 | 545 | 1.95414 |
| D4-042 | 1284 | 231576.807 | 7505551.966 | 509 | 1.95419 |
| E3-249 | 1290 | 260325.601 | 7508788.508 | 603 | 1.95384 |
| D5-044 | 1296 | 185436.278 | 7486394.626 | 564 | 1.95418 |
| D4-087 | 1296 | 255687.468 | 7470706.639 | 547 | 1.95416 |
| D4-004 | 1296 | 263415.468 | 7482988.055 | 552 | 1.95409 |
| D5-086 | 1308 | 220418.606 | 7487323.823 | 937 | 1.95418 |
| D5-086 | 1308 | 225476.097 | 7482325.387 | 454 | 1.95417 |
| D4-104 | 1320 | 226023.367 | 7499567.458 | 568 | 1.95418 |
| D4-062 | 1320 | 228033.228 | 7493633.483 | 552 | 1.95419 |
| D4-064 | 1320 | 248551.238 | 7490500.546 | 610 | 1.95417 |
| D4-079 | 1320 | 255631.462 | 7478668.982 | 617 | 1.95409 |
| D4-083 | 1320 | 267985.406 | 7463066.870 | 596 | 1.95410 |
| E4-021 | 1320 | 291005.202 | 7437512.898 | 559 | 1.95419 |
| E3-053 | 1320 | 300444.318 | 7426834.086 | 732 | 1.95417 |
| E3-263 | 1325 | 287143.306 | 7442092.289 | 713 | 1.95415 |
| E3-250 | 1326 | 356372.558 | 7428220.690 | 582 | 1.95382 |
| D4-054 | 1332 | 218694.299 | 7507788.681 | 737 | 1.95423 |
| E4-123 | 1332 | 279269.224 | 7461347.983 | 627 | 1.95418 |
| E3-017 | 1332 | 294496.340 | 7447460.711 | 670 | 1.95419 |
| E3-260 | 1340 | 278107.313 | 7502688.092 | 853 | 1.95419 |
| E3-261 | 1340 | 306672.964 | 7493064.920 | 556 | 1.95418 |
| D4-021 | 1344 | 248418.270 | 7501759.207 | 596 | 1.95415 |
| E3-075 | 1344 | 335877.623 | 7434126.415 | 744 | 1.95418 |
| D4-051 | 1356 | 298019.576 | 7471815.932 | 587 | 1.95416 |
| D4-044 | 1356 | 298749.610 | 7459585.398 | 556 | 1.95420 |
| D3-050 | 1360 | 288389.088 | 7461232.475 | 588 | 1.95422 |
| D4-059 | 1368 | 222017.283 | 7525411.477 | 634 | 1.95398 |
| D4-053 | 1368 | 258837.739 | 7493733.577 | 555 | 1.95372 |
| E3-025 | 1368 | 301711.744 | 7436493.126 | 1149 | 1.95421 |
| D4-088 | 1380 | 248797.651 | 7481697.152 | 646 | 1.95397 |
| E4-124 | 1380 | 274605.269 | 7436012.687 | 607 | 1.95409 |
| E3-084 | 1380 | 312158.901 | 7438642.535 | 749 | 1.95416 |

Tabela 10b: Dados de entrada da análise de regressão múltipla.

| Estação Pluviométrica | Variável Dependente | Variáveis Independentes | | | |
|-----------------------|---------------------|-------------------------|-------------|----------|-------------------|
| | i.p.m.a | Leste | Norte | Altitude | Log da Inclinação |
| D4-089 | 1388 | 254051.809 | 7484101.228 | 668 | 1.95403 |
| D7-065 | 1390 | 205582.974 | 7522580.605 | 713 | 1.95415 |
| D4-043 | 1392 | 228690.960 | 7531930.101 | 571 | 1.95397 |
| E4-030 | 1392 | 285289.895 | 7421433.887 | 687 | 1.95419 |
| E3-032 | 1392 | 309221.582 | 7480769.825 | 668 | 1.95418 |
| D5-062 | 1404 | 177631.556 | 7501419.984 | 552 | 1.95419 |
| D4-103 | 1404 | 240293.119 | 7484347.890 | 609 | 1.95421 |
| E3-092 | 1404 | 316058.182 | 7449955.990 | 769 | 1.95419 |
| E4-062 | 1416 | 285582.877 | 7432768.236 | 667 | 1.95419 |
| E3-154 | 1428 | 325136.439 | 7442905.340 | 704 | 1.95417 |
| D3-002 | 1428 | 329337.686 | 7485560.374 | 940 | 1.95407 |
| D5-082 | 1444 | 201412.045 | 7496302.890 | 542 | 1.95416 |
| E3-247 | 1452 | 333538.654 | 7445787.865 | 733 | 1.95420 |
| D4-036 | 1464 | 230704.222 | 7542086.476 | 713 | 1.95418 |
| D4-023 | 1476 | 203052.455 | 7534031.722 | 641 | 1.95323 |
| E3-074 | 1500 | 344177.525 | 7449763.357 | 725 | 1.95418 |
| D4-074 | 1512 | 225441.754 | 7517438.330 | 797 | 1.95417 |
| E3-230 | 1512 | 344167.168 | 7441207.036 | 762 | 1.95419 |
| D4-035 | 1535 | 229400.638 | 7551179.367 | 749 | 1.95418 |
| D4-016 | 1540 | 237053.227 | 7519397.053 | 777 | 1.95422 |
| D4-108 | 1580 | 218298.768 | 7554067.713 | 792 | 1.95419 |
| E3-255 | 1600 | 340947.097 | 7462717.473 | 820 | 1.95419 |
| E3-257 | 1650 | 348393.363 | 7471753.367 | 857 | 1.95423 |
| E3-223 | 1668 | 351850.122 | 7440422.654 | 889 | 1.95422 |
| E3-258 | 1695 | 377521.856 | 7462309.475 | 854 | 1.95422 |
| D4-080 | 1740 | 312962.060 | 7463574.155 | 770 | 1.95414 |
| E4-016 | 1812 | 263834.350 | 7431840.376 | 1022 | 1.95422 |

A Figura 8 apresenta os histogramas de freqüência e diagrama de análise de tendências para os parâmetros i.p.m.a, altitude e log da inclinação. É possível observar que o i.p.m.a. possui uma distribuição simétrica, com a faixa de maior freqüência entre 1266 e 1422 mm/ano, e tendência dos valores mais altos se acumulam a noroeste e a leste.

A altitude possui uma distribuição assimétrica positiva, com a maior freqüência ocorrendo entre 520 e 660 metros, e uma tendência de ocorrência de valores mais elevados principalmente para leste, como foi possível observar também na Figura 8.

Para obter a inclinação do terreno, o ARCGIS utiliza a média máxima aritmética do ângulo tangente da inclinação dos 8 vizinhos próximos com o ponto analisado, a partir da equação:

$$inclinação = ATAN(\sqrt{(dz/dx)^2 + (dz/dy)^2}) \quad (15)$$

Ou em graus como sendo:

$$inclinação_graus = ATAN(\sqrt{(dz/dx)^2 + (dz/dy)^2}) * 57.29578 \quad (16)$$

Onde dx e dy são as distâncias entre o ponto e seu vizinho e, dz a diferença de cota entre ambos.

Segundo Kravchencko *et al.* (1996) o método a ser aplicado utiliza o log do ângulo de inclinação, por esse motivo, os valores do log da inclinação seriam muito baixos devido ao baixo ângulo de inclinação médio, que variou entre 1 e 3°. Por esse motivo, foi feito o log do complemento do ângulo de inclinação. Dessa forma, os valores do log da inclinação ficaram próximos a 1,95 alterando somente a partir da terceira casa decimal.

O resultado da análise de regressão múltipla gerou uma série de dados que serão a seguir destacados:

- a estatística da regressão realizada em 88 amostras apresentou um erro padrão de 113,12 e um RQuadrado de 0,45;
- o fator ANOVA, apresentou um F de significância próximo a zero, o que indica a aplicabilidade dos valores de regressão (LOURENÇO e LANDIM, 2004), utilizando um grau de liberdade 4;
- os coeficientes de regressão indicaram que o i.p.m.a. possui uma maior correlação com a altitude, depois com as coordenadas Leste e Norte respectivamente. O coeficiente do log da inclinação, com seu valor negativo, representa a baixa correlação com o i.p.m.a., como apresentado na equação da superfície polinomial a seguir:

$$i.p.m.a. = 100.550,631 + 0,589.Altitude + 0,002.Leste + 0,001.Norte - 58.113,173.LogIncl$$

(17)

A partir dos coeficientes de correlação o ARCGIS utilizou tal superfície polinomial resultante da regressão múltipla **(17)**, para obter os resíduos da regressão do i.p.m.a., como apresentados na Tabela 11.

Tabela 11: Resíduos da análise de regressão do i.p.m.a..

| Estação | i.p.m.a | Resíduo | Regressão | Estação | i.p.m.a | Resíduo | Regressão |
|---------|---------|---------|-----------|---------|---------|---------|-----------|
| E4-044 | 1032 | -297 | 1329 | E3-250 | 1326 | -5 | 1331 |
| E3-021 | 1032 | -314 | 1346 | D4-054 | 1332 | -64 | 1396 |
| D4-090 | 1104 | -115 | 1219 | E4-123 | 1332 | 15 | 1317 |
| D4-063 | 1116 | -115 | 1231 | E3-017 | 1332 | 0 | 1332 |
| E4-013 | 1116 | -94 | 1210 | E3-260 | 1340 | -177 | 1517 |
| D4-019 | 1128 | -115 | 1243 | E3-261 | 1340 | -23 | 1363 |
| D4-086 | 1140 | -134 | 1274 | D4-021 | 1344 | 3 | 1341 |
| D7-038 | 1152 | -120 | 1272 | E3-075 | 1344 | -49 | 1393 |
| D4-091 | 1152 | -101 | 1253 | D4-051 | 1356 | 22 | 1334 |
| D4-072 | 1152 | -99 | 1251 | D4-044 | 1356 | 63 | 1293 |
| D4-096 | 1164 | -152 | 1316 | D3-050 | 1360 | 58 | 1302 |
| D4-085 | 1164 | -77 | 1241 | D4-059 | 1368 | -18 | 1386 |
| D3-069 | 1164 | -327 | 1491 | D4-053 | 1368 | 31 | 1337 |
| D4-109 | 1176 | -69 | 1245 | E3-025 | 1368 | -220 | 1588 |
| E4-037 | 1188 | -85 | 1273 | D4-088 | 1380 | 37 | 1343 |
| E4-015 | 1188 | -67 | 1255 | E4-124 | 1380 | 120 | 1260 |
| D4-005 | 1224 | -89 | 1313 | E3-084 | 1380 | 0 | 1380 |
| D4-003 | 1236 | 53 | 1183 | D4-089 | 1388 | 26 | 1362 |
| D4-069 | 1236 | -50 | 1286 | D7-065 | 1390 | -10 | 1400 |
| D4-084 | 1236 | -112 | 1348 | D4-043 | 1392 | 22 | 1370 |
| D4-092 | 1248 | 9 | 1239 | E4-030 | 1392 | 107 | 1285 |
| E3-018 | 1255 | 9 | 1246 | E3-032 | 1392 | -15 | 1407 |
| D4-068 | 1260 | -20 | 1280 | D5-062 | 1404 | 164 | 1240 |
| D4-081 | 1260 | 11 | 1249 | D4-103 | 1404 | 98 | 1306 |
| D4-049 | 1272 | 84 | 1188 | E3-092 | 1404 | -11 | 1415 |
| D7-036 | 1272 | -40 | 1312 | E4-062 | 1416 | 122 | 1294 |
| D4-011 | 1272 | -70 | 1342 | E3-154 | 1428 | 52 | 1376 |
| D4-102 | 1284 | 62 | 1222 | D3-002 | 1428 | -167 | 1595 |
| D4-056 | 1284 | 14 | 1270 | D5-082 | 1444 | 193 | 1251 |
| D4-042 | 1284 | 4 | 1280 | E3-247 | 1452 | 47 | 1405 |
| E3-249 | 1290 | -96 | 1386 | D4-036 | 1464 | 4 | 1460 |
| D5-044 | 1296 | 68 | 1228 | D4-023 | 1476 | 52 | 1424 |
| D4-087 | 1296 | 31 | 1265 | E3-074 | 1500 | 80 | 1420 |
| D4-004 | 1296 | -6 | 1302 | D4-074 | 1512 | 54 | 1458 |
| D5-086 | 1308 | -169 | 1477 | E3-230 | 1512 | 88 | 1424 |
| D5-086 | 1308 | 107 | 1201 | D4-035 | 1535 | 40 | 1495 |
| D4-104 | 1320 | 23 | 1297 | D4-016 | 1540 | 80 | 1460 |
| D4-062 | 1320 | 41 | 1279 | D4-108 | 1580 | 68 | 1512 |
| D4-064 | 1320 | -8 | 1328 | E3-255 | 1600 | 108 | 1492 |
| D4-079 | 1320 | -2 | 1322 | E3-257 | 1650 | 115 | 1535 |
| D4-083 | 1320 | 25 | 1295 | E3-223 | 1668 | 167 | 1501 |
| E4-021 | 1320 | 72 | 1248 | E3-258 | 1695 | 147 | 1548 |
| E3-053 | 1320 | -17 | 1337 | D4-080 | 1740 | 301 | 1439 |
| E3-263 | 1325 | -16 | 1341 | E4-016 | 1812 | 344 | 1468 |

A seguir, foi realizada a KDE, utilizando o software ISATIS, tendo como entrada as variáveis regionalizadas do i.p.m.a. e, como a variável de deriva externa, o resíduo obtido com a análise de regressão múltipla.

Os parâmetros de cálculo do variograma experimental (Figura 9) e de vizinhança para a KDE foram: passo de 9.000 m com uma tolerância de 50%, 17 passos, anisotropia mista em 0° e 90°, efeito pepita a 7.500, sistema de busca por quadrante com mínimo de 3 e máximo de 8 vizinhos a uma distância máxima em X e Y de 6.500 m:

- I modelo (direção 0°): esférico com amplitude a 2.600 m e patamar a 45.000;
- II modelo (direção 90°): esférico com amplitude a 5.200 m e patamar a 20.000.

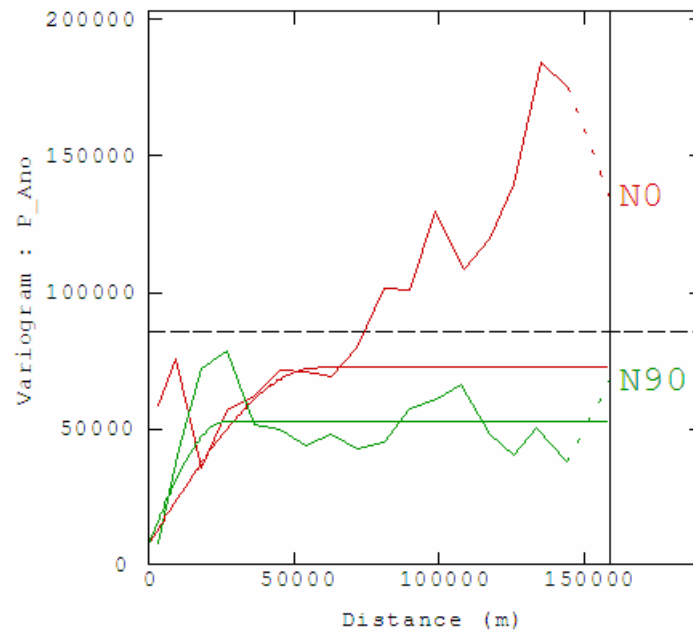


Figura 9: Variograma experimental do i.p.m.a..

A seguir foi realizada a estimativa do i.p.m.a. por KDE no ISATIS. A Figura 10 ilustra o resultado dessa interpolação.

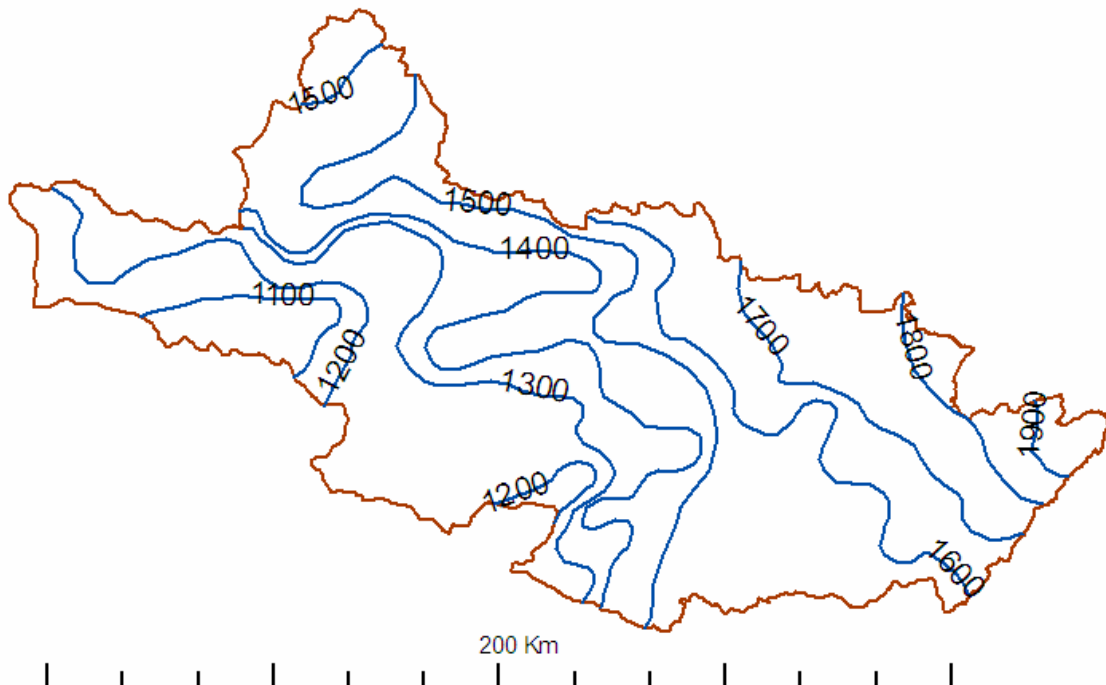


Figura 10: Isoietas do índice pluviométrico médio anual da UGRHI-PCJ

A Figura 10 indica um aumento gradativo da precipitação pluviométrica em sentido às regiões com maiores altitudes, ou seja, vai de 1100 na porção sudoeste à 1150 mm/ano para norte e, de 1200 na região meridional a 1900 mm/ano para leste e nordeste.

16.2. MAPA DE VULNERABILIDADE - GODP

O resultado da interpolação pela KDE foi exportado em formato .ascii e então indexado à projeção UTM Córrego Alegre 23S, e posteriormente convertido para coordenadas geográficas datum SAD69 (Figura 10) para seu cruzamento com o Mapa 3. Como já apresentado, foram testados três índices para as faixas de i.p.m.a. (Tabela 8) e, seus resultados representados na Figura 11.

16.2.1. Comparação entre os três testes do modelo GODP e o modelo GOD

O Teste P apresentou uma redução no índice de vulnerabilidade do aquífero Guarani em relação ao estimado no Mapa 3, passando de alta para média vulnerabilidade. Também ocorreu uma redução do índice da vulnerabilidade do aquífero Serra Geral, na porção basáltica passando de extrema para alta vulnerabilidade e de média para baixa vulnerabilidade, como é possível observar na porção extremo oeste da Figura 10. E, não apresentou uma feição na qual se destacam as áreas com maiores e menores pluviometrias, contudo, acarretou em uma homogeneização da porção central do mapa, o que trabalhando nessa escala pode ser considerado como interessante, devido à redução de detalhes e minimização de erros.

O Teste P', diferentemente do teste anterior, demarcou feições entre áreas com distintas pluviometrias, como é possível observar em toda faixa sul da área. Contudo, houve uma redução significativa dos índices de vulnerabilidade dos aquíferos Pré-Cambriano (porção Sul), Guarani e Serra Geral, fato qual não converge para a expectativa de vulnerabilidade desses aquíferos. Mostrando-se assim um teste pouco coerente.

Por sua vez, o Teste +P apresentou um aumento gradual de todos os índices de vulnerabilidade, com destaque para o aquífero Pré-Cambriano, que passou de média para alta vulnerabilidade. Na porção noroeste do mapa ficou em destaque a passagem de alta para extrema vulnerabilidade do aquífero Guarani, destacando o índice pluviométrico. Contudo, o índice atribuído ao aquífero Passa-Dois, passou de

desprezível para baixo, o que pode não condizer com a realidade, devido ao seu baixo potencial hídrico e transmissividade.

Dessa forma, dentre os três testes realizados para aferição do método de inserção da pluviometria ao mapa de vulnerabilidade utilizando o modelo GOD (Mapa 3), o teste +P mostrou-se mais coerente com relação ao que se esperar dessa inserção, devido à somatória do índice pluviométrico ao invés de seu produto, que acarretou no aumento do índice final de forma gradual, elevando o índice final de vulnerabilidade. Salientando as áreas com maior pluviometria, com destaque na área de recarga do maio aquífero do mundo.

Sendo assim, o modelo proposto nessa dissertação mostrou-se pertinente em termos técnicos e científicos, já que insere um parâmetro altamente correlacionável com a vulnerabilidade de aquíferos, assim como possui pré-requisitos bem definidos. Ainda que, não tenham sido realizados testes em volume suficiente para uma perfeita aferição do modelo, o teste +P, indicou a linha de raciocínio que deverá ser conduzida caso estudos futuros venham a ser realizados utilizando essa metodologia. Dessa forma, a melhor forma de chamar esse modelo de estimativa de vulnerabilidade natural da água subterrâneas em escalas reduzidas, seria GOD+P.

17. CONCLUSÃO

Essa dissertação consolidou diversas informações de caráter técnico-científico que poderão ser de significativa ajuda para quem for realizar uma pesquisa de cunho ambiental e/ou planejamento na UGRHI-PCJ, tanto em termos de compilação de informações como aplicação de ferramentas computacionais em geociências. As informações que merecem destaque quanto a essa característica são: banco de dados dos principais produtos e contaminantes de origem industrial; a distribuição das indústrias por ramo de atividade; o uso da água superficial e subterrânea assim como o descarte de resíduos urbanos; consolidado de informações referentes às características hidrogeológicas que envolvem a estimativa da vulnerabilidade de aquíferos, além dos mapas de vulnerabilidade, topografia e pluviometria da UGRHI-PCJ.

A geoestatística aplicada, apesar de tecnicamente não ter sido essencial para a elaboração do modelo GODP, devido à escala de trabalho adotada, se mostrou pertinente quanto à característica de investigação científica e seus resultados satisfatórios, as ferramentas utilizadas assim como os critérios aplicados.

Resumidamente, a estimativa da vulnerabilidade dos aquíferos da UGRHI-PCJ através do modelo GOD apresentou, de certa forma previsível, a alta vulnerabilidade do aquífero Guarani, média vulnerabilidade dos aquíferos fraturados, baixa vulnerabilidade do aquífero Tubarão, e desprezível vulnerabilidade do aquífero Passa-Dois.

A comparação dos três testes realizados para a inserção da pluviometria ao modelo GOD indicou um melhor resultado para o teste +P. Tal afirmação é devida ao fato de que a estimativa de vulnerabilidade manteve os aquíferos mais sensíveis como o Guarani e o fraturado com índice alto ou extremo. Além disso, também destacou que as áreas com maiores índices pluviométricos anuais, que acarretou em uma diferenciação do índice de vulnerabilidade dentro de um mesmo aquífero, com destaque na porção norte do aquífero Guarani.

A proposta da inserção de um quarto parâmetro, a pluviometria, ao modelo GOD, apesar de justificável empiricamente, está em fase de desenvolvimento. O índice adotado para cada faixa de pluviometria deve ser melhor avaliado e aprimorado, ficando até o presente momento, o modelo GOD+P como o que apresentou o melhor resultado.

Por fim, cabe destacar que a aplicação de Sistema de Informação Geográfica mostrou-se determinante para o tratamento dos dados e resultados. Sua apresentação visualmente agradável, tecnicamente correta e suficiente, mostrou-se de tanta importância quanto a estimativa da vulnerabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABORRAGE, A.M., LOPES, R.C. (1986) - *Projeto Borda Leste da Bacia do Paraná: integração geológica e avaliação econômica*. Porto Alegre, Departamento Nacional da Produção Mineral-Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. v18.

ALMEIDA, F.F.M. (1986) - Distribuição regional e relações tectônicas do magmatismo pós-Paleozóico no Brasil. *RBG*, **16**(4): 325-349.

ALMEIDA, F.F.M. e MELO, M.S. (1981) - A Bacia do Paraná e o vulcanismo mesozóico. *In*: Almeida, F.F.M., Hasui, Y., Ponçano, W.L., Dantas, A.S.L., Carneiro, C.D.R., Melo, M.S., Bistrichi, C.A. *Mapa Geológico do Estado de São Paulo, escala 1:500.000*. São Paulo, IPT, (Programa de Desenvolvimento de Recursos Minerais: Pró Minério). p46-81.

ASTM (1996) – Standards on Ground Water and Vadose Zone Investigations: Drilling, Sampling, Well Installation and Abandonment Procedures: D4696-92 *Standard Guide for Pore-Liquid Sampling from the Vadose Zone*. American Society for Testing and Material-Philadelphia. p68-98.

ASTM (1996a) –Standards on Ground Water and Vadose Zone Investigations: Drilling, Sampling, Well Installation and Abandonment Procedures: D3404-91 *Standard Guide for Measuring Matric Potential in the Vadose Zone using Tensiometers*. American Society for Testing and Material-Philadelphia. p23-32.

BASSOI, L.J e GUAZELLI, M.R. (2004) - *Curso de Gestão Ambiental: Controle Ambiental da Água* – USP, FSP, FAU, NISA – Barueri/SP. p53-99.

BERGMANN M. (1988) - *Caracterização estratigráfica e estrutural da seqüência vulcano-sedimentar do Grupo São Roque, na região de Pirapora do Bom Jesus- SP*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 167p.

BOTTER, D.A. e PAULA, G.A. e LEITE, J.G. e CORDANI, L.K. (1996) – Noções de Geoestatística – com apoio computacional. Versão Preliminar (fev/1996). Instituto de Matemática e Estatística. Universidade de São Paulo. 202p.

CAMPONOGARA, I e BRUTTI, E.A. e KONRAD, C.G. e J.Z. GOLDANI e SILVA J.L.S. (2004) - Mapeamento da Vulnerabilidade Natural à Contaminação de Aquíferos e Risco de Poluição dos Recursos Hídricos Subterrâneos no Município de Soledade/RS. *In*: Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário. UFSC Florianópolis, Outubro, 2004. (disponível em http://geodesia.ufsc.br/Geodesia-online/arquivo/cobrac_2004/132.pdf).

CETESB (2006) - *Relatório de qualidade ambiental do Estado de São Paulo*. São Paulo. (versão digital disponível em www.cetesb.sp.gov.br).

CETESB (2004) - *Relatório de Qualidade das Águas Interiores do Estado de São Paulo/2003*. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, São Paulo/SP. 273p.

CETESB (2001) - *Relatório de Estabelecimento de Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo*. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, São Paulo/SP. 13p.

COPLAENGE (2003) - Plano de Bacias Hidrográficas 2000-2003 - Comitê das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari, Jundiá. Fundo Estadual de Recursos Hídricos – FEHIDRO. Fase 3 - *Relatório Final*. São Paulo. 184p.

COUTINHO, J.M.V. (1972) - Petrologia do Pré-cambriano de São Paulo e arredores. *In: Boletim do Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo.* **3**(1): 5-99.

CPRM (2004) – Carta Geológica do Brasil Milionésimo: Sistema de Informação Geográficas-SIG, etapa 1:1.000.000. *Conselho de Pesquisa e Recursos Minerais – Serviço Geológico do Brasil. Folhas SF-22 e SF-23.* Serviço Geológico Brasileiro. (CD-Rom).

DAEE, IG, IPT e CPRM (2005) – *Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo.* Governo do Estado de São Paulo. 3v.119p.

DAVIS, C.J. (1973) – *Statistics and Data Analysis in Geology.* Kansas Geological Survey. John Wiley & Sons, Inc.. 656p.

DEUTSCH, C.V. e JOURNEL, A.G. (1988) - *GSLIB Geostatistics Software Library and User's Guide* – New York Oxford University Press, Second ed. 340p.

DNPM (1979) – *Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, folha Rio de Janeiro SF.23,* por Mário Gesteira Fonseca (e outros), Departamento Nacional de Pesquisa Mineral, Brasília. (CD-Rom).

DNPM (1978) – *Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, folha Paranapanema SF.22,* por Diógenes Almeida Campos (e outros). Departamento Nacional de Pesquisa Mineral, Brasília. (CD-Rom).

ESRI (2001) - *ARCGIS Geoestatistical Analyst: statistical tools for data exploration, modeling and advanced surface generation.* An ESRI White Paper, August 2001. New York. 19p.

FIESP (2003) – CD : *A Indústria Paulista. Federação das Indústrias do Estado de São Paulo.* São Paulo. v.2003 (CD-Rom).

FOSTER, S (1988) – Groundwater Recharge and Pollution Control of British Aquifers: a critical overview. *In: Robins, N. (editor). Groundwater pollution, aquifer recharge and vulnerability.* Geological Society, London, Special Publication. **130**(1): 7-22.

FOSTER, S. e HIRATA, R. (1998) – *Groundwater pollution risk evaluation: a methodology based on available data.* CEPIS/PAHO Technical Report Lima/Peru. 78p.

FOSTER, S. e VENTURA, M. e HIRATA, R. (1993) – *Poluição das águas subterrâneas: um documento executivo da situação da América Latina e Caribe com relação ao abastecimento de água potável.* Instituto Geológico, São Paulo/SP – 1993. 55p.

FOSTER, S. e HIRATA, R. e GOMES, D. e D'ELIA, M. e PARIS, M. (2002) – Groundwater Quality Protection: a guide for water utilities, municipal authorities and environmental agencies, *Groundwater Management Advisory Team (GW-MATE)* -The World Bank, Washington, D.C.. 101p.

GUYMON, G.L. (1994) – *Unsaturated Zone Hydrology.* Prentice Hall, Inc. New Jersey. 210p.

HIRATA, R. (2001) – Oito Perguntas e Oito Tentativas de Resposta Sobre a Vulnerabilidade à Poluição de Aquíferos. *In: CYNTED-Red XVII – A: Vulnerabilidade de Aquíferos – Taller I: Protección de aquíferos frente a la contaminación: metodología.* Toluca México – 2001. 4p.

IBE, K. M. e NWANKWOR, G. I. e ONYEKURU, S. O. (1999) - Assessment of Groundwater Vulnerability and Its Application to the Development of Protection Strategy for the Water Supply Aquifer in Owerri, *In: Environmental Geology Journal Southeastern Nigeria Department of Geology, Federal University of Technology, Owerri, Nigeria.* **50**(3): 323-360.

IG e CETESB e DAEE (1997) - *Mapeamento da Vulnerabilidade e Risco de Poluição das Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo.* Instituto Geológico, CETESB, DAEE, Secretaria de Estado do Meio Ambiente; Coordenado por Ricardo César Aoki Hirata, Carai Ribeiro de Assis Barros, Gerôncio Albuquerque Rocha, São Paulo/SP. 144p.

IRRIGART (2005) – Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá: situação dos recursos hídricos 2002/2003. *Relatório Síntese.* Piracicaba: FEHIDRO/PCJ/CBJ-PCJ, 2005. 104p.

JACOBUS, J.V. e SIMMERS, I. (2002) - Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. *Hydrogeology Journal.* **10**(1): 5–17

JARVIS, A.; REUTER, H.I e GUEVARA, N.A.E. (2006) - Hole-filled seamless SRTM data V3, *In: International Centre for Tropical Agriculture (CIAT).* (formato digital disponível em <http://srtm.csi.cgiar.org>)

JMR (2006) - *Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo 2004/2007.* Governo do Estado de São Paulo, Conselho Estadual de Recursos Hídricos – Comitê Coordenador do Plano Estadual de Recursos Hídricos. Consórcio JMR Engecorps. 52p.

KRAVCHENKO, A.; ZHANG, R. e TUNG, Y.K. (1996) – Estimation of Mean Annual Precipitation in Wyoming Using Geostatistical Analysis. American Geophysical Union, *In: 16th Annual Hydrology Days.* Fort Collins, Colorado. **16**(1) 271–282.

LANDIM, P.M.B. (1985) – *Introdução a Geoestatística. Laboratório de Geomatématica.* Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro - UNESP. Publicação Didática nº2. p32-39.

LOURENÇO D.A. (2005) – *Geoestatística Aplicada aos dados de Potenciometria do Reservatório de Três Irmãos, Pereira Barreto-SP.* Monografia de Trabalho de Formatura. Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo. 96p.

LOURENÇO, R.W. e LANDIM, P.M.B. (2004) – Análise de Regressão Múltipla Espacial. UNESP/Rio Claro, IGCE, DGA, Lab. Geomatématica, Texto Didático 13. 34p *Residual Kriging with Application to Regional Groundwater Levels.* *In: Mathematical Geology.* **6**(5): 499-521.

MARQUES, L.S. e ERNESTO, M. (2004). O magmatismo toleítico da Bacia do Paraná. *In: Mantesso-Neto, V.; Bartorelli, A.; Carneiro, C.D.R.; Brito-Neves, B.B.B. (coords.), Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida,* Editora Beca, São Paulo. p245-263.

- MELFI, A.J., PICCIRILLO, E.M. e NARDI, A.J.R. (1988). Generalized geological sketch map of Paraná basin. *In: Melfi, A.J., Piccirillo, E.M. (eds.) The Mesozoic Flood Volcanism of the Paraná Basin: petrogenetic and geophysical aspects*. Instituto de Astronomia e Geofísica. Universidade de São Paulo. p3.
- MELO, M.S. (1995) - *A formação Rio Claro e depósitos associados: sedimentação Neocenozóica na Depressão Periférica*. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 144p.
- MEZZARILA, S., AZEVEDO, A.A.B., TOMINAGA, L.K., PRESSINOTTI, M.M.N. e MASSOLI, M. (1981) - Léxico estratigráfico do estado de São Paulo. *In: Boletim do Instituto Geográfico e Geológico*. **5**(1): 1-161.
- MILANI, E.J. (1997) - *Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana sul-ocidental*. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. v2: 255p.
- NEUMAN S.P. e JACOBSON E.A. (1984) – Analysis of Nonintrinsic Variability by Residual Kriging with Application to Regional Groundwater Levels. *In: Mathematical Geology*. **6**(5): 499-521.
- PONÇANO, W.L. (1981). As coberturas Cenozóicas. *In: Mapa Geológico do Estado de São Paulo, escala 1:500.000*. São Paulo, Secretaria da Indústria, Comércio, Ciência e Tecnologia/PROMOCET. **1**(1): 82-96.
- SCALON, B.R. e HEALY, R.W. e COOK, P.G. (2002) – Choosing Appropriate Techniques for Quantifying Groundwater Recharge. *In: Hydrogeology Journal*. **10**(1): 18-39.
- SCHERER, C.M.S. (1998) - *Análise estratigráfica e litofaciológica da Formação Botucatu (Cretáceo Inferior da Bacia do Paraná) no Rio Grande do Sul*. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 202p.
- SCHNEIDER, R.L. e MÜHLMANN, H. e TOMMASI, E. e MEDEIROS, R. A. e DAEMON, R. F. e NOGUEIRA, A. A. (1974) - Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. *In: Anais do Congresso Brasileiro de Geologia*. Porto Alegre. **28**(1): 41-65.
- SEADE (2003) – Anuário Estatístico do Estado de São Paulo – Saneamento. Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados. Ano 2003. (versão eletrônica disponível em <http://www.seade.gov.br/produtos/anuario/2003/index.php>).
- SELKER S.J. e KELLER C.K. e McCORD J.T. (1999) – *Vadose Zone Process*. CRC Press LLC. p18-39.
- SHEREVE R.N. e BRINK J. A. (1980) - *Indústria de Processos Químicos*. Guanabara Dois, 4ªed. 717p.
- SILVA, C.C.A. (2004) - *Curso de Gestão Ambiental: Gerenciamento de Riscos Ambientais – USP, FSP, FAU, NISA – Barueri/SP – 2004*. p791-803.
- SOARES, A. (2000) - *Geoestatística para ciências da terra e do ambiente*. I.S.T. Press. 206p.

SOPER, R.C. (2006) – *Groundwater Vulnerability to Agrochemical: A GIS – Based Drastic Model Analysis of Carrol, Chariton, and Saline Counties. Missouri, USA*. Master Degree Dissertation. Graduate School University of Missouri, Columbia. 147p.

USEPA (1986) *Septic System and Ground-Water Protection: an executive guide*. U.S. Environmental Protection Agency. Washington, D.C.. 13p.

VALERIANO, M.M. (2004) – Modelo de Elevação Digital com Dados SRTM disponíveis para a América do Sul. *In: INPE 10550 RPQ/756*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, São Paulo. 72p.

VARNIER, C.L. (2001) - *O Efeito do Nitrogênio Proveniente de Sistemas de Saneamento "in situ" na Qualidade das Águas Subterrâneas em Aquíferos Livres e Rasos*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.150p.

ANEXO

FIGURAS 6, 7, 8 e 11

MAPAS 1, 2 e 3