

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

**O USO DE TÉCNICAS GEOESTATÍSTICAS PARA O
MAPEAMENTO DA VULNERABILIDADE NATURAL DO
AQUÍFERO GUARANI EM ÁREA DE RECARGA.
APLICAÇÃO NA REGIÃO DE RIBEIRÃO BONITO-SP.**

Gabriela Trigo Ferreira

Rio Claro - SP
2014

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

Gabriela Trigo Ferreira

**O USO DE TÉCNICAS GEOESTATÍSTICAS PARA O
MAPEAMENTO DA VULNERABILIDADE NATURAL DO
AQUÍFERO GUARANI EM ÁREA DE RECARGA.
APLICAÇÃO NA REGIÃO DE RIBEIRÃO BONITO-SP.**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente.

Orientador: José Ricardo Sturaro

Rio Claro - SP
2014

Gabriela Trigo Ferreira

**O USO DE TÉCNICAS GEOESTATÍSTICAS PARA O
MAPEAMENTO DA VULNERABILIDADE NATURAL DO
AQUÍFERO GUARANI EM ÁREA DE RECARGA.
APLICAÇÃO NA REGIÃO DE RIBEIRÃO BONITO-SP.**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente.

Comissão Examinadora

José Ricardo Sturaro

Paulo Milton Barbosa Lamdim

Mara Lucia Marques

Rio Claro, SP 21 de Março de 2014

RESUMO - O Aquífero Guarani possui áreas de recarga onde ele encontra-se exposto e, portanto, sujeito à contaminação por efluentes e rejeitos depositados sobre os solos que o cobrem. Por isso, é de extrema relevância o conhecimento do seu grau de vulnerabilidade natural, contribuindo para sua proteção em todos os níveis. O projeto apresenta uma forma alternativa e quantitativa para o mapeamento da vulnerabilidade natural de um aquífero através da aplicação do método AVI. O Índice AVI, utilizado como medida da vulnerabilidade, requer a razão entre a espessura da zona insaturada e a permeabilidade do ponto ensaiado. Tendo em vista que o Índice AVI, alvo deste estudo, apresenta-se em classes de vulnerabilidade, optou-se pelo uso da geoestatística não paramétrica, ou seja, calculando-se os valores médios tanto para a espessura da zona insaturada como para a permeabilidade. Empregou-se a krigagem indicativa para obterem-se os resultados, visto que ela pode fornecer as respostas em classes probabilísticas. O resultado final é representado pelos mapas da permeabilidade e de vulnerabilidade da área de estudo localizada na região de Ribeirão Bonito-SP.

Palavras-chave - Krigagem indicativa. Geoestatística. Aquífero Guarani. Índice de Vulnerabilidade de Aquíferos.

ABSTRACT – The Guarani Aquifer has recharge areas where it is exposed and therefore subject to contamination by effluents and tailings deposited on soils that cover this areas. Therefore it is extremely important the knowledge of his natural vulnerability, contributing for their protection at all levels. The project presents an alternative and quantitative form of mapping the natural aquifer vulnerability by applying the method AVI. The AVI Index, used as a measure of vulnerability, requires the ratio between the thickness of the unsaturated zone and the permeability of the tested point. Given that the AVI Index, target of this study, presented in classes of vulnerability, it was opted for the use of non-parametric geostatistics, ie, calculating the average values for the thickness of the unsaturated zone and for the permeability . It was used the indicative kriging to obtain the results since it can provide the results in probabilistic classes. The result is represented by the maps of the permeability and the vulnerability of the study area located in Ribeirão Bonito-SP.

Keywords- Indicative kriging. Geoestatistics. Guarani Aquifer. Aquifer Vulnerability Index.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização do Sistema Jacaré	13
Figura 2. Figura ilustrativa das 32 cartas topográficas 1:10.000 que compõem a área de estudo.....	13
Figura 3. Ciclo Hidrológico	15
Figura 4. Esquemática de um Aquífero livre e de um Aquífero Artesiano.....	20
Figura 5. Ocorrência de água no Planeta	21
Figura 6. Processos comuns de poluição da água subterrânea	25
Figura 7. Importância de comparar a vulnerabilidade dos aquíferos à contaminação	28
Figura 8. Localização dos afloramentos do Aquífero Guarani	32
Figura 9. Seção geológica da Bacia Sedimentar do Paraná e fluxo previsto para as formações geológicas do Aquífero Guarani, na região de Ribeirão Preto – SP	33
Figura 10. Divisão da UGRHI 13	35
Figura 11. Distribuições Percentuais de IAP e IVA em 2003.....	37
Figura 12. Mapa geológico simplificado com a distribuição das principais unidades geológicas nas sub-bacias da UGRHI-13.....	41
Figura 13. Mapa geomorfológico simplificado apresentando a distribuição dos principais sistemas de relevo nas sub-bacias da UGRHI-13	47
Figura 14. Mapa pedológico simplificado apresentando a distribuição das principais associações de solo nas sub-bacias da UGRHI-13.....	52
Figura 15. Localização do Aquífero Guarani no Estado de São Paulo.....	54
Figura 16. Bulbo de saturação d'água no solo	59
Figura 17. Esquema básico de uma função variograma	63
Figura 18. Representação dos modelos variográficos	65
Figura 19. Figura ilustrativa do acesso à área de estudo	69
Figura 20. Imagem SRTM da área de estudo.....	74
Figura 21. Histograma de frequência da variável cota topográfica.....	75
Figura 22. Variograma modelado da cota topográfica.....	75
Figura 23. Superfície da Cota Topográfica.....	76
Figura 24. Distribuição espacial de pontos amostrados, inseridos no mosaico de 32 folhas que compõem a área de estudo.....	77

Figura 25. Histograma de frequência da variável Nível Estático	78
Figura 26. Variograma modelado para o Nível Estático	79
Figura 27. Superfície do Nível Estático	79
Figura 28. Superfície da zona insaturada média obtido pela diferença entre as malhas da topografia e cota do nível estático	81
Figura 29. Variograma da espessura da camada da zona insaturada	82
Figura 30. Mapa dos valores esperados (e-type) da camada insaturada	83
Figura 31. Distribuição espacial dos ensaios de permeabilidade	84
Figura 32. Histograma de frequência da variável de condutividade hidráulica	85
Figura 33. Variograma modelado para a condutividade hidráulica	86
Figura 34. Mapa da condutividade hidráulica (k), em metro/dia	86
Figura 35. Mapa dos valores médios esperados (e-type) do Índice AVI	88
Figura 36. Mapa da probabilidade do Índice AVI estar entre 0 a 10 anos	89
Figura 37. Mapa da probabilidade do Índice AVI estar entre 10 a 20 anos	90
Figura 38. Mapa da probabilidade do Índice AVI estar entre 20 a 30 anos	91
Figura 39. Mapa da probabilidade do Índice AVI ser maior do que 30 anos	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Síntese dos processos atuantes no ciclo hidrológico.....	16
Tabela 2. Definição prática das classes de vulnerabilidade do aquífero.....	30
Tabela 3 Estimativa das demandas (fontes superficiais e subterrâneas) em 2004.....	38
Tabela 4. Distribuição percentual em área das unidades geológicas por sub-bacia da UGRHI-13	40
Tabela 5. Coluna litoestratigráfica de parte da Bacia do Paraná.....	70

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Classificação climática segundo Koeppen	53
Quadro 2. Classes de vulnerabilidade do Índice AVI	57

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 Área de estudo	12
1.2 Objetivos	14
2. REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 Recursos Hídricos	14
2.1.1 Ciclo Hidrológico.....	14
2.1.2 Processos atuantes no ciclo hidrológico	16
2.1.3 Aquíferos	17
2.1.4 Hidrogeologia de Aquíferos	18
2.1.5 Ocorrência de Aquíferos	19
2.1.6 Classificação de Aquíferos	19
2.1.7 Recarga de Aquíferos	20
2.2 Águas Subterrâneas	21
2.2.1 Importância das águas subterrâneas	21
2.2.2 Qualidade das águas subterrâneas	22
2.2.3 Poluição das Águas Subterrâneas	24
2.2.4 Proteção das Águas Subterrâneas	26
2.3 Vulnerabilidade de Aquíferos	27
2.3.1 Vulnerabilidade do aquífero à contaminação	27
2.3.2 Mapeamento da vulnerabilidade do Aquífero à Contaminação	29
2.3.3 Limitações para o Mapeamento da Vulnerabilidade	30
2.4 Sistema Aquífero Guarani (SAG)	31
2.4.1 Características Geológicas	33
2.5 Características da Unidade Hidrográfica de Gerenciamento de Recursos Hídricos Tietê/Jacaré (UGRHI 13)	34
2.5.1 Descrição Geral	34
2.5.2 Conjuntura socioeconômica	36
2.5.3 Águas superficiais	36
2.5.4 Águas subterrâneas	37
2.5.5 Demandas	38
2.5.6 Principais problemas apontados no plano de bacia/relatório zero	38

2.6 Distribuição das principais Unidades Geológicas nas Sub-bacias da UGRHI-13	39
2.7 Geomorfologia	42
2.7.1 Considerações sobre fontes de dados	42
2.7.2 Planalto ocidental	42
2.7.3 Cuestas Basálticas	43
2.7.4 Sistemas de relevo presentes na UGRHI-13	44
2.8 Pedologia	48
2.8.1 Considerações sobre as fontes de dados	48
2.8.2 Unidades pedológicas da UGRHI-13	48
2.9 Climatologia	53
2.10 O Aquífero Guarani na área de estudo	53
2.11 Geoestatística	55
3. PROCEDIMENTO METODOLÓGICO	56
3.1 Levantamento de dados bibliográficos	56
3.2 Trabalho de campo	56
3.3 Índice de Vulnerabilidade de Aquíferos – AVI	57
3.3.1 Espessura da camada da Zona Insaturada	58
3.3.2 Permeabilidade da camada	58
3.3.2.1 Permeâmetro de Guelph	58
3.4 Obtenção da superfície da cota topográfica	60
3.5 Obtenção da espessura da zona insaturada	60
3.6 Obtenção da Condutividade Hidráulica da Camada	61
3.7 Análises Geoestatísticas	61
3.7.1 Análise exploratória dos dados	61
3.7.2 Análise da Variabilidade espacial	62
3.7.3 Análise variográfica	62
3.7.4 Modelos variográficos	63
3.7.5 Krigagem	65
3.7.5.1 Krigagem ordinária	66
3.7.5.2 Krigagem e simulação indicativa	66
3.7.5.3 Krigagem com o GSLIB	68
4. CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO	69

4.1 Vias de acesso	69
4.2 Geologia	69
4.2.1 Grupo São Bento	71
4.2.2 Grupo Bauru	72
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	73
5.1 Superfície topográfica	73
5.2 Superfície do nível estático	77
5.3 Determinação da Zona Insaturada	80
5.4 Determinação da Condutividade Hidráulica (K).....	83
5.5 Mapa do Índice AVI	87
6. CONCLUSÕES	93
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

A água doce é um recurso natural finito, necessário a quase todas as atividades do ser humano, por isso, são preocupações mundiais a falta de água e a poluição. As quantidades de água exigidas pelos diversos consumos poderão tornar o atendimento cada vez mais difícil, devido à escassez dos mananciais, aos períodos de seca e ao excesso de desperdício (DAEE, 2013).

Vide o momento atual, a água subterrânea é uma significativa fonte de água doce para o desenvolvimento e uso humano. Assim, os aquíferos representam reservatórios de água doce de inestimável valor e, portanto, devem ser protegidos para um desenvolvimento sustentável. O aquífero Guarani constitui um dos maiores reservatórios de água doce do mundo e foi uma das motivações desta pesquisa.

Uma das principais preocupações existentes com relação à exploração futura das águas do Aquífero Guarani é o risco de deterioração do mesmo, em decorrência desse aumento dos volumes explorados e do crescimento das fontes de poluição pontuais e difusas (ARAÚJO *et al.*, 1995). Portanto, surge a necessidade de se implementar políticas de gerenciamento e de proteção desse recurso, além de campanhas de conscientização da população sobre o uso racional e preservação dos recursos hídricos.

O aquífero possui áreas de recarga, ou seja, áreas livres por onde ocorre o seu abastecimento pelo movimento da água sob forças gravitacionais, as quais estão sujeitas à contaminação por efluentes e/ou rejeitos depositados sobre os solos que o cobrem. Portanto, é essencial não apenas o conhecimento do seu grau de vulnerabilidade natural, ou seja, maior ou menor suscetibilidade em ser afetado por uma carga poluidora, como a sua proteção em todos os níveis.

O estudo sobre a vulnerabilidade de aquíferos pode ser uma ferramenta importante para o planejamento de uso e ocupação da terra, bem como para a proteção das águas subterrâneas. Segundo Foster e Hirata (1988), a vulnerabilidade natural de um aquífero depende da acessibilidade dos fluxos de contaminantes à zona insaturada e da capacidade de atenuação da zona insaturada, através de reações químicas e detenção física dos contaminantes.

Um dos motivos para a escolha da área de estudo foi o fato de o Aquífero Guarani encontrar-se aflorante em boa parte dessa região, entre Boa Esperança do Sul – SP e Ribeirão Bonito – SP, além disso, a cidade de Ribeirão Bonito capta a água diretamente dessa área

aflorante que por gravidade chega até a cidade. O conhecimento das características e do comportamento do Aquífero Guarani é muito importante em regiões como essa, pois são áreas sujeitas à recarga direta e são naturalmente mais vulneráveis.

Neste trabalho foram utilizadas algumas das principais técnicas geoestatísticas, como a krigagem ordinária e a krigagem indicativa. Com base nessas análises, foram obtidos mapas da espessura do solo insaturado e da permeabilidade, a partir dos quais, elaboraram-se mapas classificatórios do Índice de Vulnerabilidade do Aquífero (método AVI) que permite expressar a vulnerabilidade natural de aquíferos em diferentes classes de acordo com o tempo que seria necessário para que uma substância potencialmente poluidora atingisse o nível do lençol freático.

1.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo faz parte das Bacias Hidrográficas dos rios Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira, também denominada de “Sistema Jacaré”. O referido sistema estende-se por 140km de comprimento (noroeste – sudeste) e 70km de largura (norte – sul), drenando uma área correspondente a 6.748km² e com 447km de perímetro. A região localiza-se na porção central do Estado de São Paulo, entre os paralelos 21°37’ e 22°31’ de latitude sul e os meridianos 47°43’ e 49°02’ de longitude oeste (figura 1).

Os rios Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira deságuam na região do curso médio do Rio Tietê e pertencem à Bacia Hidrográfica Tietê-Jacaré, a qual compõe uma das 22 Unidades Hidrográficas de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) do Estado de São Paulo, mais precisamente a UGRHI-13.

A área de estudo é composta por 32 cartas topográficas na escala 1:10.000 e está ilustrada na figura 2.

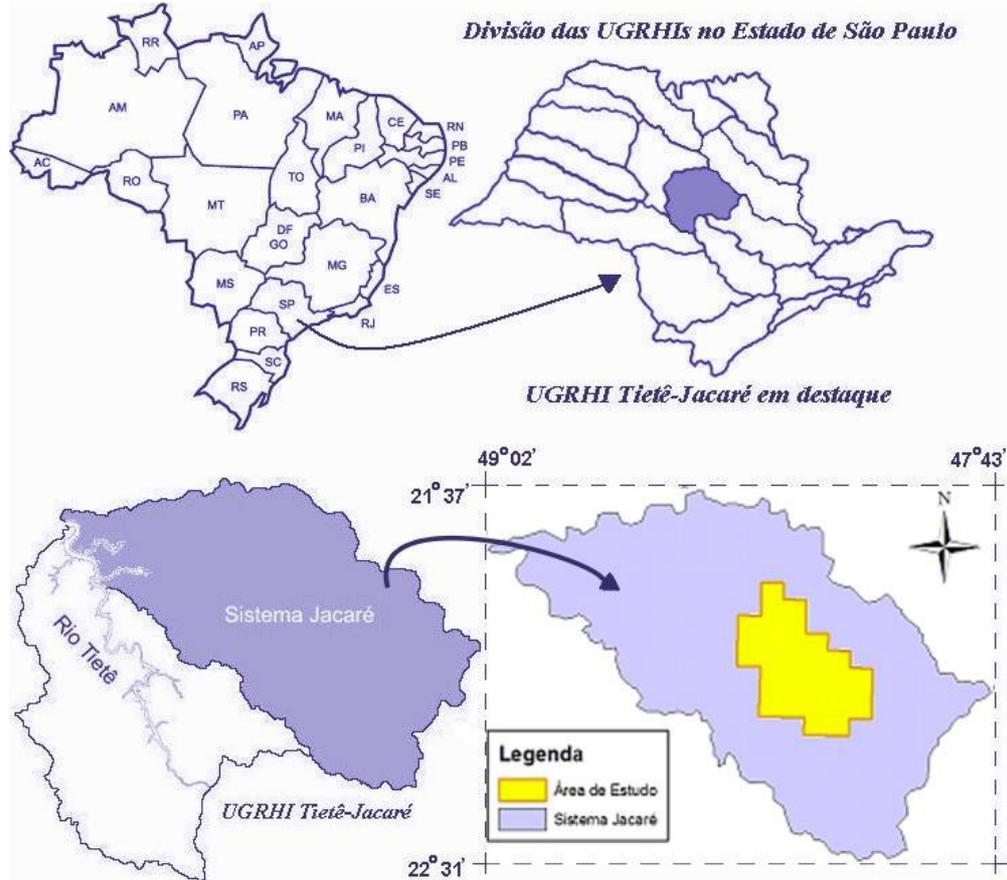


Figura 1. Localização do Sistema Jacaré.
 Fonte: Brandt, 2010.

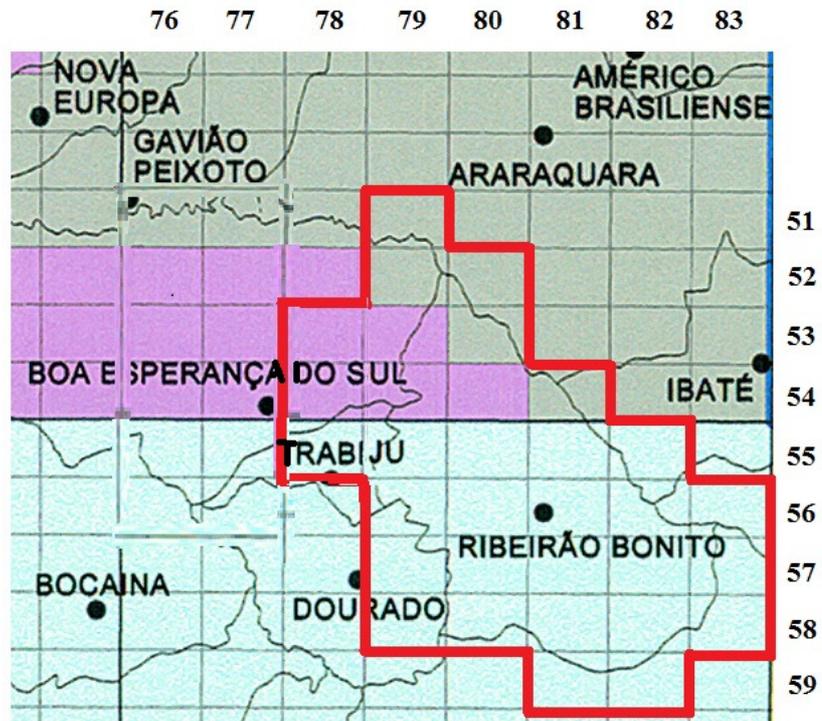


Figura 2. Figura ilustrativa das 32 cartas topográficas 1:10.000 que compõem a área de estudo.

1.2 OBJETIVOS

A presente pesquisa teve por objetivo utilizar recursos da geoestatística para efetuar o cálculo do Índice de Vulnerabilidade Natural de águas subterrâneas, denominado de AVI.

Com o uso das técnicas geoestatísticas, espera-se a elaboração de mapas mais robustos, pois além da estimativa do valor médio, pode-se estimar um parâmetro de dispersão associado à estimativa. Este aspecto fornece a confiabilidade do valor estimado.

Escolheu-se uma área de recarga do aquífero na região dos municípios de Ribeirão Bonito e Boa Esperança do Sul, no Estado de São Paulo, tendo em vista a importância da mesma, pois a cidade de Ribeirão Bonito é abastecida pelas águas do Aquífero.

CAPÍTULO 2 – REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 RECURSOS HÍDRICOS

2.1.1 Ciclo Hidrológico

Segundo o Ministério do Meio Ambiente, o ciclo hidrológico ou ciclo da água é o movimento contínuo da água presente nos oceanos, continentes (superfície, solo e rocha) e na atmosfera. Esse movimento é alimentado pela força da gravidade e pela energia do Sol, que provocam a evaporação das águas dos oceanos e dos continentes. Na atmosfera, forma as nuvens que, quando carregadas, provocam precipitações, na forma de chuva, granizo, orvalho e neve.

Nos continentes, a água precipitada pode seguir os diferentes caminhos:

- Infiltra e percola (passagem lenta de um líquido através de um meio) no solo ou nas rochas, podendo formar aquíferos, ressurgir na superfície na forma de nascentes, fontes, pântanos, ou alimentar rios e lagos;
- Flui lentamente entre as partículas e espaços vazios dos solos e das rochas, podendo ficar armazenada por um período muito variável, formando os aquíferos;
- Escoa sobre a superfície, nos casos em que a precipitação é maior do que a capacidade de absorção do solo;
- Evapora retornando à atmosfera. Em adição a essa evaporação da água dos solos, rios e lagos, uma parte da água é absorvida pelas plantas. Essas, por sua vez, liberam a

água para a atmosfera através da transpiração. A esse conjunto, evaporação mais transpiração, dá-se o nome de evapotranspiração;

- Congela formando as camadas de gelo nos cumes de montanha e geleiras.

Apesar das denominações água superficial, subterrânea e atmosférica, é importante salientar que, na realidade, a água é uma só e está sempre mudando de condição. A água que precipita na forma de chuva, neve ou granizo, já esteve no subsolo, em icebergs e passou pelos rios e oceanos. A água está sempre em movimento; é graças a isto que ocorrem: a chuva, a neve, os rios, lagos, oceanos, as nuvens e as águas subterrâneas.

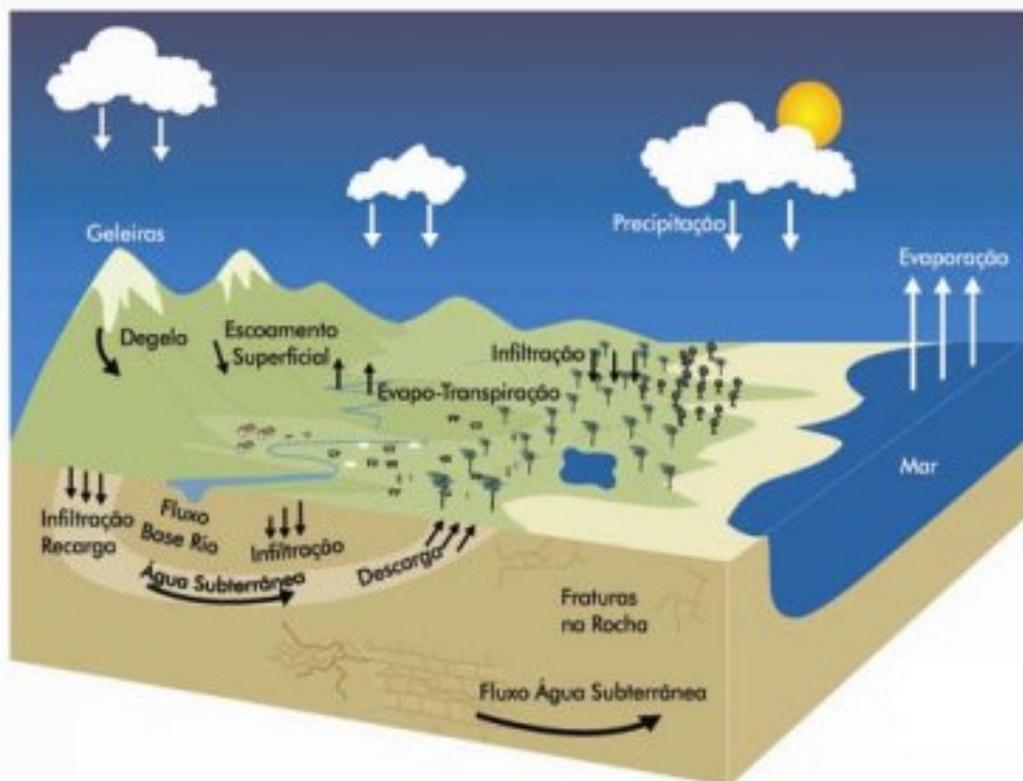


Figura 3. Ciclo Hidrológico.

Fonte: Ministério do Meio Ambiente.

2.1.2 Processos atuantes no ciclo hidrológico

Tabela 1. Síntese dos processos atuantes no ciclo hidrológico.

Fonte: Braga et.al.(2002) apud Meaulo (2004).

Processos do Ciclo Hidrológico	Descrição do Processo
Precipitação	Água que cai sobre o solo ou sobre o corpo d'água.
Detenção	Parte da precipitação fica retida na vegetação, depressões do terreno e construções. Essa massa de água retorna à atmosfera pela ação da evaporação ou penetra no solo pela infiltração.
Escoamento superficial	Constituído pela água que escoar sobre o solo, fluindo para locais de altitudes inferiores, até atingir um corpo d'água como um rio, lago ou oceano.
Evaporação	Em qualquer das fases descritas anteriormente a água pode voltar à atmosfera na forma de vapor, reiniciando o ciclo hidrológico.
Evapotranspiração	Parte da água existente no solo que é utilizada pela vegetação é eliminada pelas folhas na forma de vapor.
Infiltração	A água infiltrada pode sofrer evaporação, ser utilizada pela vegetação, escoar ao longo da camada superior do solo ou alimentar o N.A. subterrânea.
Escoamento subterrâneo	Constituído por parte da água infiltrada na camada superior do solo, sendo bem mais lento que o escoamento superficial. Parte desse escoamento alimenta os rios e os lagos, além de ser responsável pela manutenção desses corpos durante épocas de estiagem.

2.1.3 Aquíferos

De acordo com Pedrosa e Caetano (2012), aquíferos são corpos rochosos com propriedades de armazenar e transmitir as águas subterrâneas. A função mais tradicional e ainda de maior alcance de um aquífero é como fornecedor de água naturalmente potável. Os processos de filtração e as reações bio-geoquímicas que ocorrem no subsolo fazem com que as águas subterrâneas apresentem, geralmente, boa potabilidade e sejam melhor protegidas dos agentes de poluição.

As águas subterrâneas são realimentadas pelas infiltrações de águas de origem meteóricas. Essas águas fluem lentamente (mm/dia, cm/dia ou m/dia) pelos poros e ou fissuras/fraturas intercomunicantes das rochas, armazenando-se em reservatórios subterrâneos ou alimentando os rios (efluência), lagos e nascentes durante os períodos sem chuvas, ou ainda, vão desaguar diretamente nos oceanos e mares, de onde evaporam e sobem à atmosfera para dar origem a novas chuvas, representando parcela significativa do ciclo hidrológico.

A taxa de infiltração de água no solo depende de muitos fatores, entre os quais:

- 1) Sua porosidade: A presença de argila no solo diminui sua porosidade, não permitindo uma grande infiltração.
- 2) Cobertura vegetal: Um solo coberto por vegetação é mais permeável do que um solo desmatado.
- 3) Inclinação do terreno: em declividades acentuadas a água corre mais rapidamente, diminuindo o tempo de infiltração.
- 4) Tipo de chuva: Chuvas intensas saturam rapidamente o solo, ao passo que chuvas finas e demoradas têm mais tempo para se infiltrarem.

A água que se infiltra está submetida a duas forças fundamentais: a gravidade e a força de adesão de suas moléculas às superfícies das partículas do solo (força de capilaridade). Pequenas quantidades de água no solo tendem a se distribuir uniformemente pela superfície das partículas. A força de adesão é mais forte do que a força da gravidade que age sobre esta água. Como consequência ela ficará retida, quase imóvel, não atingindo zonas mais profundas. Chuvas finas e passageiras fornecem somente água suficiente para repor esta umidade do solo. Para que haja infiltração até a zona saturada é necessário primeiro satisfazer esta necessidade da força capilar.

2.1.4 Hidrogeologia de Aquíferos

De acordo com a Cetesb (2013), compreender as características litológicas, estratigráficas e estruturais dos solos, sedimentos e rocha permite entender o processo de infiltração da água no subsolo, a forma como as unidades geológicas armazenam e transmitem a água subterrânea e as influências nos seus aspectos relativos à quantidade e qualidade.

A infiltração é favorecida nos materiais porosos e permeáveis. A porosidade, que é a relação entre o volume de poros ou vazios e o volume total de um certo material, pode ter a sua origem relacionada a formação de rochas ou sedimentos, sendo caracterizada nas rochas sedimentar e pelos espaços entre os grãos ou planos de estratificação, sendo nesse caso, denominada de porosidade primária. Pode estar relacionada também aos eventos tectônicos que deformam as rochas, criando fraturas e fissuras e nesse caso é denominada de porosidade secundária, ocorrendo principalmente nas rochas cristalinas (ígneas ou metamórficas). Há ainda outro tipo de porosidade secundária que é constituída de uma rede de vazios milimétricos a métricos originados da dissolução de rochas carbonáticas.

Quanto maior a homogeneidade do tamanho e da distribuição dos poros e maior a interconexão entre esses poros, melhor capacidade terá o aquífero em conduzir a água. Essa propriedade é denominada de permeabilidade e assim como a porosidade pode ser primária ou secundária.

Entre outras propriedades físicas dos aquíferos, destacam-se a condutividade hidráulica, a transmissividade e o coeficiente de armazenamento, importantes para caracterizar os aquíferos quanto aos seus aspectos hidráulicos.

A condutividade hidráulica (K), expressa em cm/s, refere-se à facilidade da formação aquífera de exercer a função de um condutor hidráulico e depende tanto das características do meio (porosidade, tamanho, distribuição, forma e arranjo das partículas), quanto da viscosidade do fluido. Essa propriedade é utilizada também para estimar a velocidade de deslocamento da água e das plumas de contaminação, pela seguinte fórmula $V = K \times i$, onde i é o gradiente hidráulico, ou seja, a diferença de carga hidráulica entre dois pontos distantes horizontalmente. Em comparação com a topografia de um terreno, “ i ” seria a declividade.

A transmissividade (T), dada em m²/s, corresponde à quantidade de água que pode ser transmitida horizontalmente por toda a espessura saturada do aquífero. Pode conceituá-la como a taxa de escoamento da água através de uma faixa vertical do aquífero com largura unitária submetida a um gradiente hidráulico unitário. Para aquíferos confinados a

transmissividade é calculada pela expressão $T = K \times b$, onde b é a espessura saturada do aquífero.

Dessa diversificação de características que constitui as unidades geológicas fornecedoras de água subterrânea, podemos classificar os aquíferos como Aquíferos Porosos e Aquíferos fraturados ou fissurados.

2.1.5 Ocorrência de Aquíferos

De acordo com a Cetesb (2013), os aquíferos porosos ocorrem em rochas sedimentares, sedimentos inconsolidados e solos. São bons produtores de água e ocorrem em grandes áreas. No Estado de São Paulo podem ser citados, entre outros, os Aquíferos Bauru e o Guarani. Já os aquíferos fraturados ou fissurados ocorrem em rochas ígneas e metamórficas, onde a porosidade primária não é significativa do ponto de vista de armazenamento e transmissão de água. A sua produtividade, que geralmente não é grande, depende da densidade de fraturas ativas e sua intercomunicação. Em São Paulo os exemplos são os Aquíferos Serra Geral e pré-Cambriano (Cristalino).

2.1.6 Classificação de Aquíferos

De acordo com a Cetesb (2013), Os aquíferos podem ser classificados de acordo com a pressão das águas nas suas superfícies limítrofes na base e no topo e também em função da capacidade de transmissão de água das camadas (base e topo) entre as quais está situado.

➤ Aquíferos livres ou freáticos

Em um aquífero livre, o seu topo não é limitado por camada impermeável, está em contato com a superfície e a pressão da água é a mesma que a pressão atmosférica, sendo que o nível d'água varia em função da recarga, normalmente exercida pela infiltração da água da chuva. Ocorre a profundidades que variam de alguns metros até poucas dezenas de metros da superfície, associado ao regolito, sedimentos de cobertura ou rochas. A figura 3 esquematiza um aquífero deste tipo. São os aquíferos mais comuns e mais explorados pela população. São também os que apresentam maiores problemas de contaminação.

A atividade antrópica é um elemento que pode interferir no processo de recarga através da alteração das condições de permeabilidade do solo, da redistribuição espacial de recarga (decorrente de construções e atividades em áreas urbanas), do desmatamento ou troca da cobertura nativa por vegetação de necessidade hídrica naturalmente incomum.

2.2 ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

2.2.1 Importância das águas subterrâneas

Segundo a Cetesb (2013), a quantidade de água existente no Planeta Terra é considerada constante desde 500 milhões de anos, porém a maior parte dela que corresponde a 97,5% está contida nos mares e oceanos e, portanto é salgada. Excluindo a água congelada dos polos, a água doce representa apenas 0,6% do total. Destes, 98% estão contidas nos aquíferos e apenas 2% nos rios e lagos.



Figura 5. Ocorrência da água no Planeta.

Fonte: CETESB, 2013.

Frente à crescente demanda dos recursos hídricos, a exploração das águas subterrâneas é uma alternativa bastante atraente para abastecimento, em virtude da sua abundância, qualidade e relativo baixo custo de captação, principalmente considerando-se a condição inadequada de qualidade das águas superficiais associada ao elevado custo do tratamento

dessas águas para os diversos usos e a escassez verificada em algumas regiões. Assim, o recurso hídrico subterrâneo vem se tornando estratégico para desenvolvimento econômico da sociedade, devendo, portanto ser protegido contra a poluição.

É importante considerar as águas subterrâneas no ciclo hidrológico, de modo que sua exploração para os diversos usos não altere o fluxo de base das águas superficiais. A Resolução nº 22 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos - CNRH estabelece que os Planos de Recursos Hídricos devem promover a caracterização dos aquíferos e definir as inter-relações de cada aquífero com os demais corpos hídricos superficiais e subterrâneos e com o meio ambiente, visando a gestão sistêmica, integrada e participativa das águas.

No Estado de São Paulo, atualmente, aproximadamente 80% dos municípios são total ou parcialmente abastecidos por águas subterrâneas, atendendo uma população de mais de 5,5 milhões habitantes.

O uso da água subterrânea para abastecimento público tende a aumentar no Estado de São Paulo, bem como é grande a demanda por captação privada para hotéis, condomínios, hospitais e indústrias. O Órgão Estadual Gestor da quantidade das águas é o Departamento de Águas e Energia Elétrica - DAEE, que concede outorga de direito de uso das águas aos usuários, observando a disponibilidade hídrica, a qualidade da água e a priorização dos usos.

2.2.2 Qualidade das águas subterrâneas

De acordo com a Cetesb (2013), do ponto de vista hidrogeológico a qualidade da água subterrânea é tão importante quanto o aspecto quantitativo. A disponibilidade dos recursos hídricos subterrâneos para determinados tipos de uso depende fundamentalmente da qualidade físicoquímica, biológica e radiológica.

A qualidade da água é definida como o resultado do conjunto de características físicas, químicas, biológicas e organolépticas, cujo padrão deve estar relacionado com o seu uso para um fim específico (ABNT/NBR 9896/1993).

Os processos e fatores que influem na evolução da qualidade das águas subterrâneas podem ser intrínsecos e extrínsecos ao aquífero. A princípio, a água subterrânea tende a aumentar concentrações de substâncias dissolvidas à medida que percola os diferentes aquíferos. No entanto muitos outros fatores interferem, tais como clima, composição da água

de recarga, tempo de contato entre a água e o meio físico e outros, além da contaminação causada pelo homem.

A água destituída de constituintes químicos só é possível em condições laboratoriais avançadas, sendo assim na natureza ela se apresenta sempre incorporada de outras substâncias. As substâncias nela dissolvidas, orgânicas ou inorgânicas, naturais ou antrópicas, lhe conferem o seu caráter químico, sua cor, temperatura, e a radioatividade lhe conferem o caráter físico.

A água é conhecida como solvente universal dada sua característica polarizada e tem muita facilidade de reagir com substâncias, sejam elas orgânicas ou inorgânicas. Pelo fato do maior contato com o solo ou rocha, menor velocidade de escoamento, maiores pressões e temperaturas a que estão submetidas e maior facilidade de dissolver gás carbônico ao percolar no solo, as águas subterrâneas têm concentrações de sais maiores que as águas superficiais. A forma iônica é predominante nas águas subterrâneas e as substâncias variam conforme a litologia (cristalina, sedimentar clástico ou sedimentar químico).

Em geral, os constituintes principais como bicarbonato, cálcio, cloreto e magnésio apresentam-se em concentrações maiores que 5mg/L, os constituintes menores ou secundários como carbonato, fluoreto e ferro, apresentam-se em concentrações entre 5 e 0,01 mg/L e os elementos traços (metais) apresentam concentrações menores que 0,01mg/L.

As propriedades físicas, químicas e microbiológicas da água são traduzidas em termos de parâmetros que permitem classificá-la quanto à sua qualidade e apontar a presença e a concentração de substâncias tóxicas, sendo possível sua comparação com padrões e valores orientadores estabelecidos conforme o uso.

Quando a contaminação acontece, a remoção é muito mais difícil de ser feita do que no caso das águas de superfície, podendo em alguns casos tornar-se irreversível. Isto ocorre em consequência do lento movimento da água subterrânea sobretudo em camadas de materiais finos, como argilas e siltes. O estudo hidrogeoquímico tem por finalidade identificar e quantificar as principais propriedades e constituintes químicos das águas subterrâneas, procurando estabelecer uma relação com o meio físico.

2.2.3 Poluição das águas subterrâneas

De acordo com a Cetesb (2013), historicamente na civilização humana, o solo tem sido utilizado para disposição dos resíduos gerados nas atividades cotidianas, tendo certa capacidade de atenuar e depurar a maior parte dos resíduos. Entretanto, a sociedade tem se tornado de tal forma complexa que a quantidade e a composição dos resíduos e efluentes gerados foram alteradas em ordem de grandeza nas últimas décadas, sendo que a capacidade do solo em reter os poluentes tem sido ultrapassada. Assim, apesar de serem mais protegidas que as águas superficiais, as águas subterrâneas podem ser poluídas ou contaminadas quando os poluentes atravessam a porção não saturada do solo.

As principais fontes potenciais de contaminação das águas subterrâneas são: os lixões; aterros mal operados; acidentes com substâncias tóxicas; atividades inadequadas de armazenamento, manuseio e descarte de matérias primas, produtos, efluentes e resíduos em atividades industriais, como indústrias químicas, petroquímicas, metalúrgicas, eletroeletrônicas, alimentícias, galvanoplastias, curtume, etc.; atividades minerárias que expõem o aquífero; sistemas de saneamento "in situ"; vazamento das redes coletoras de esgoto; o uso incorreto de agrotóxicos e fertilizantes; bem como a irrigação que pode provocar problemas de salinização ou aumentar a lixiviação de contaminantes para a água subterrânea; e outras fontes dispersas de poluição.

Um indicador de poluição difusa de água subterrânea é o nitrato. Sua origem está relacionada a atividades agrícolas e esgotos sanitários. Sendo o nitrato uma forma estável de nitrogênio em condições anaeróbias, esta substância pode ser considerada persistente e sua remoção da água para atender ao padrão de potabilidade que é de 10 mg/L, é onerosa e, por vezes, tecnicamente inviável, prejudicando o abastecimento público e privado.

Outra forma de poluição das águas subterrâneas dá-se quando poluentes são lançados diretamente no aquífero, por meio de poços absorventes, sem passar pelas camadas de solo. Poços mal construídos ou operados tornam-se caminhos preferenciais para que os poluentes atinjam diretamente as águas subterrâneas.

O Potencial de poluição da água subterrânea depende:

- a) Das características, da quantidade e da forma de lançamento do poluente no solo. Quanto maior a persistência ou menor capacidade de degradação e maior sua

mobilidade no meio solo e água subterrânea, maior o potencial de poluição. Aliado a isso, uma pequena quantidade de poluentes em regiões muito chuvosas, pode transportar rapidamente as substâncias para as águas subterrâneas, mesmo considerando a capacidade do solo em atenuar os efeitos.

- b) Da vulnerabilidade intrínseca do aquífero. A vulnerabilidade de um aquífero pode ser entendida como o conjunto de características que determinam o quanto ele poderá ser afetado pela carga de poluentes. São considerados aspectos fundamentais da vulnerabilidade: o tipo de aquífero (livre a confinado), a profundidade do nível d'água, e as características dos estratos acima da zona saturada, em termos de grau de consolidação e litologia (argila a cascalho).

Uma vez poluídas ou contaminadas, as águas subterrâneas demandam um elevado dispêndio de recursos financeiros e humanos para sua remediação, o que de modo geral é atingido ao final de vários anos. Desta forma, devem ser tomadas medidas preventivas para sua proteção, associadas ao controle de poluição como um todo, definindo-se critérios de qualidade iniciando-se pelo estabelecimento de Valores Orientadores.

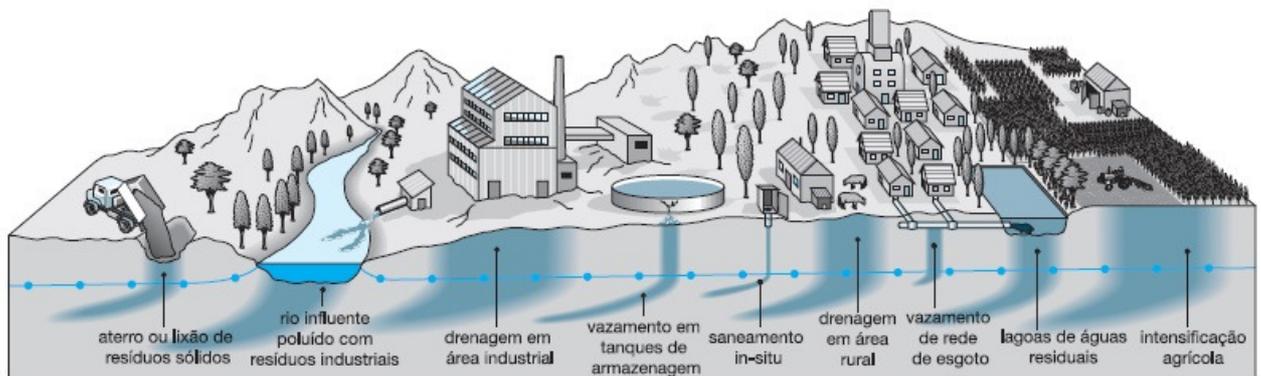


Figura 6. Processos comuns de poluição da água subterrânea.

Fonte: FOSTER et.al, 2002.

2.2.4 Proteção das águas subterrâneas

Segundo Foster et. al (2002), a água subterrânea é um recurso natural vital para o abastecimento econômico e seguro de água potável nos meios urbano e rural, e desempenha papel fundamental (embora frequentemente pouco valorizado) para o bem-estar tanto dos seres humanos como de muitos ecossistemas aquáticos.

No mundo inteiro, os aquíferos (formações geológicas contendo água subterrânea adequada para consumo) estão sob perigo cada vez maior de contaminação em decorrência da urbanização, do desenvolvimento industrial, das atividades agrícolas e das empresas de mineração.

Em toda parte, portanto, são necessárias campanhas proativas e ações práticas para proteger a qualidade natural (em geral excelente) da água subterrânea, o que se justifica tanto sob os critérios amplos da sustentabilidade ambiental como sob os critérios mais restritos do benefício econômico.

Medidas de proteção especial são realmente necessárias para todos os poços e nascentes (públicos e privados) cuja função seja fornecer água de qualidade potável ou equivalente – o que incluiria, portanto, as águas minerais envasadas e as utilizadas na fabricação de alimentos e bebidas.

Para o abastecimento público de água potável, é um pré-requisito que a qualidade da água bruta seja boa e constante, e as reservas de águas subterrâneas protegidas são as que melhor cumprem esse requisito. A utilização de processos de tratamento (além da desinfecção preventiva) para atingir esse objetivo só deve ser considerada em último caso, em virtude de sua complexidade técnica, custo financeiro e pesado encargo operacional.

O mapeamento da vulnerabilidade da água subterrânea ao risco de poluição considera dois componentes: a vulnerabilidade natural e as cargas potenciais poluidoras. O conceito de vulnerabilidade natural indica o grau de suscetibilidade de um aquífero de ser afetado por uma carga poluidora. Para a determinação da vulnerabilidade natural do aquífero, a CETESB adotou a metodologia desenvolvida por Foster e Hirata (1988) que considera a interação dos fatores intrínsecos, a forma de ocorrência da água subterrânea (tipo de aquífero); o arcabouço litológico que sustenta o aquífero na zona não saturada e a profundidade do nível da água (CETESB,2013).

A delimitação de áreas de proteção de aquíferos ou de poços e de áreas de restrição

referem-se ao estabelecimento de diretrizes ambientais para o zoneamento e controle do uso e ocupação do solo, bem como ao controle da exploração da água subterrânea. Estas áreas visam proteger a qualidade da água captada contra contaminação bacteriológica e química ou restringir a captação em casos de contaminação ou de superexploração (CETESB,2013).

2.3 VULNERABILIDADE DE AQUÍFEROS

2.3.1 Vulnerabilidade do aquífero à contaminação

Segundo Foster et. al (2002), a abordagem mais lógica ao perigo de contaminação da água subterrânea é considerá-lo como a interação entre:

- a vulnerabilidade do aquífero à contaminação, consequência das características naturais dos estratos que o separam da superfície da terra;
- a carga contaminante que é, será ou pode ser aplicada no meio como resultado da atividade humana.

Ao adotar tal esquema, pode-se ter alta vulnerabilidade, mas nenhum perigo de poluição, por causa da ausência de carga contaminante significativa, e vice-versa. Na prática, as duas condições são perfeitamente compatíveis. Além disso, a carga contaminante pode ser controlada ou modificada, mas a vulnerabilidade do aquífero é essencialmente determinada pelo contexto hidrogeológico natural.

A expressão “vulnerabilidade do aquífero à contaminação” busca representar a sensibilidade de um aquífero aos efeitos adversos de uma carga contaminante a ele imposta (figura 7). Com efeito, no jargão da gestão da qualidade dos rios, é o inverso de “capacidade de assimilação de poluentes de um corpo d’água receptor”.

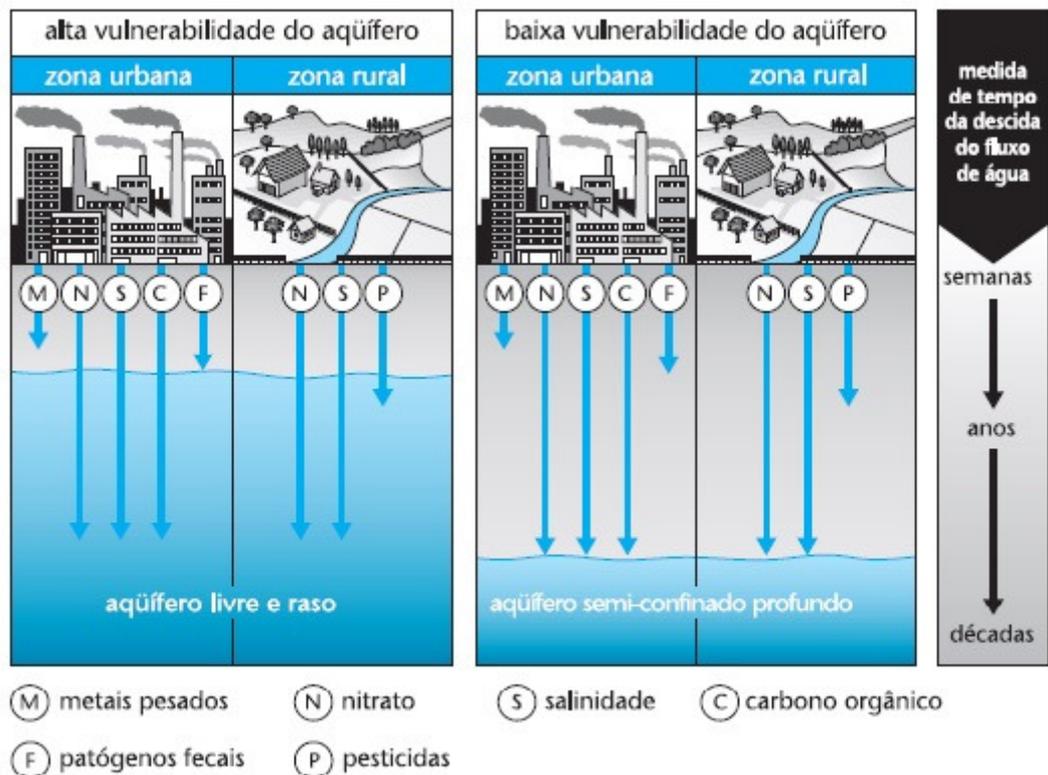


Figura 7. Importância de comparar a vulnerabilidade dos aquíferos à contaminação.

Fonte: FOSTER et.al, 2002.

A vulnerabilidade do aquífero à contaminação pode ser mapeada rapidamente. Nos mapas, podem-se sobrepor os resultados dos levantamentos da possível carga contaminante, a fim de facilitar a avaliação dos perigos de contaminação da água subterrânea. A expressão “perigo de contaminação de aquífero” designa a probabilidade de que a água subterrânea venha a apresentar concentrações de contaminantes superiores ao valor estabelecido pela OMS para a qualidade da água potável.

Se tal perigo resultará ou não em uma ameaça à qualidade da água subterrânea num determinado manancial para abastecimento público, isso dependerá primeiramente de sua zona de captura e, em segundo lugar, da mobilidade, persistência e dispersão dos contaminantes dentro do regime de fluxo do aquífero. Pode-se avaliar o perigo de contaminação da água subterrânea sobrepondo-se essas zonas de captura (perímetros de proteção do manancial) à vulnerabilidade do aquífero e, em seguida, relacionando essas zonas assim definidas aos mapas-resumos derivados do cadastro da carga contaminante potencial.

2.3.2 Mapeamento da vulnerabilidade do Aquífero à Contaminação

De acordo com Foster et. al (2002), o mapeamento da vulnerabilidade do aquífero à contaminação normalmente é o primeiro passo na avaliação do perigo de contaminação da água subterrânea e na proteção de sua qualidade, em escala municipal ou estadual.

Uma definição útil e consistente para o conceito de vulnerabilidade seria considerar a vulnerabilidade do aquífero à contaminação como o conjunto de características intrínsecas dos estratos que separam o aquífero saturado da superfície do solo, o que determina sua suscetibilidade a sofrer os efeitos adversos de uma carga contaminante aplicada na superfície (Foster, 1987 apud Foster et.al,2002). Seria então uma função da:

- acessibilidade ao aquífero saturado, no sentido hidráulico, à penetração dos contaminantes;
- capacidade de atenuação dos estratos de cobertura da zona saturada, resultante da retenção físico-química ou da reação dos contaminantes com o meio.

Do mesmo modo, o perigo de contaminação da água subterrânea seria então definido como a probabilidade de que a água subterrânea na parte superior de um aquífero atinja níveis inaceitáveis de contaminação em decorrência das atividades que se realizam na cobertura imediata da superfície do solo (Foster e Hirata, 1988; Adams e Foster, 1992 apud Foster et.al,2002).

Um índice absoluto de vulnerabilidade do aquífero à contaminação é bem mais útil (do que as indicações relativas) para todas as aplicações práticas no planejamento do uso do solo e no controle da emissão de efluentes. Pode-se desenvolver um índice absoluto integrado desde que cada categoria de vulnerabilidade seja definida com clareza e consistência (Tabela 2). É possível, assim, superar a maioria das objeções (talvez todas) que geralmente se colocam ao uso de um índice de vulnerabilidade integrado e absoluto como estrutura para a avaliação do perigo de contaminação da água subterrânea e para a formulação de políticas de proteção.

Tabela 2. Definição prática das classes de vulnerabilidade do aquífero.

Fonte: modificado de Foster et.al,2002.

CLASSE DE VULNERABILIDADE	DEFINIÇÃO CORRESPONDENTE
Extrema	vulnerável à maioria dos contaminantes com impacto rápido em muitos cenários de contaminação
Alta	vulnerável a muitos contaminantes (exceto os que são fortemente adsorvidos ou rapidamente transformados) em muitas condições de contaminação
Moderada	vulnerável a alguns contaminantes, mas somente quando continuamente lançados ou lixiviados
Baixa	vulnerável somente a contaminantes conservadores, a longo prazo, quando contínua e amplamente lançados ou lixiviados
Insignificante	presença de camadas confinantes sem fluxo vertical significativo de água subterrânea (percolação)

2.3.3 Limitações para o Mapeamento da Vulnerabilidade

Segundo Foster et. al (2002), Algumas condições hidrogeológicas constituem problema para o mapeamento e a avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação:

- a presença de corpos de água superficiais indefinidos (permanentes ou intermitentes), fundamentalmente devido à incerteza na avaliação de sua condição hidráulica, na definição da qualidade da água superficial e na capacidade de atenuação do sedimento de fundo. Entretanto, é essencial indicar as seções potencialmente influentes desses corpos de água que atravessam os aquíferos não confinados);

- a exploração excessiva do aquífero, que pode variar a profundidade do lençol freático e mesmo o grau de confinamento do aquífero. É certo, porém, que tais efeitos são pouco significativos no sistema de indexação proposto;
- argilas excessivamente consolidadas (e, portanto, potencialmente fraturadas), gerando incertezas quanto à magnitude dos componentes de fluxo preferencial.

Os mapas de vulnerabilidade servem apenas para avaliar o perigo de contaminação da água subterrânea associado às descargas de substâncias que ocorrem na superfície do terreno em fase líquida dissolvida. Não devem ser usados, a rigor, para avaliar o perigo de:

- contaminantes despejados abaixo do subsolo (como pode ocorrer em caso de vazamentos de grandes tanques de armazenagem subterrâneos, de lixiviação de aterros de resíduos sólidos sob a camada de solo e com retirada da zona vadosa, de descargas efluentes em pedreiras e minerações etc.);
- derramamento de solventes orgânicos sintéticos imiscíveis (DNAPLs).

Outra condição que requer um procedimento especial é a existência de água subterrânea de qualidade naturalmente baixa (em geral salina) a pouca profundidade. Isso demanda um mapeamento específico, já que tais aquíferos geralmente não merecem proteção especial, mesmo em casos de alta vulnerabilidade à contaminação antropogênica.

2.4 SISTEMA AQUÍFERO GUARANI (SAG)

O Aquífero Guarani abrange área aproximada de 1,2 milhões de quilômetros quadrados e está localizado nos territórios da Argentina, Brasil, Paraguai e Uruguai. Ele é considerado uma fonte de abastecimento de água doce para a crescente população mundial, pois além de águas, em geral, de boa qualidade, possui potencial energético termal.

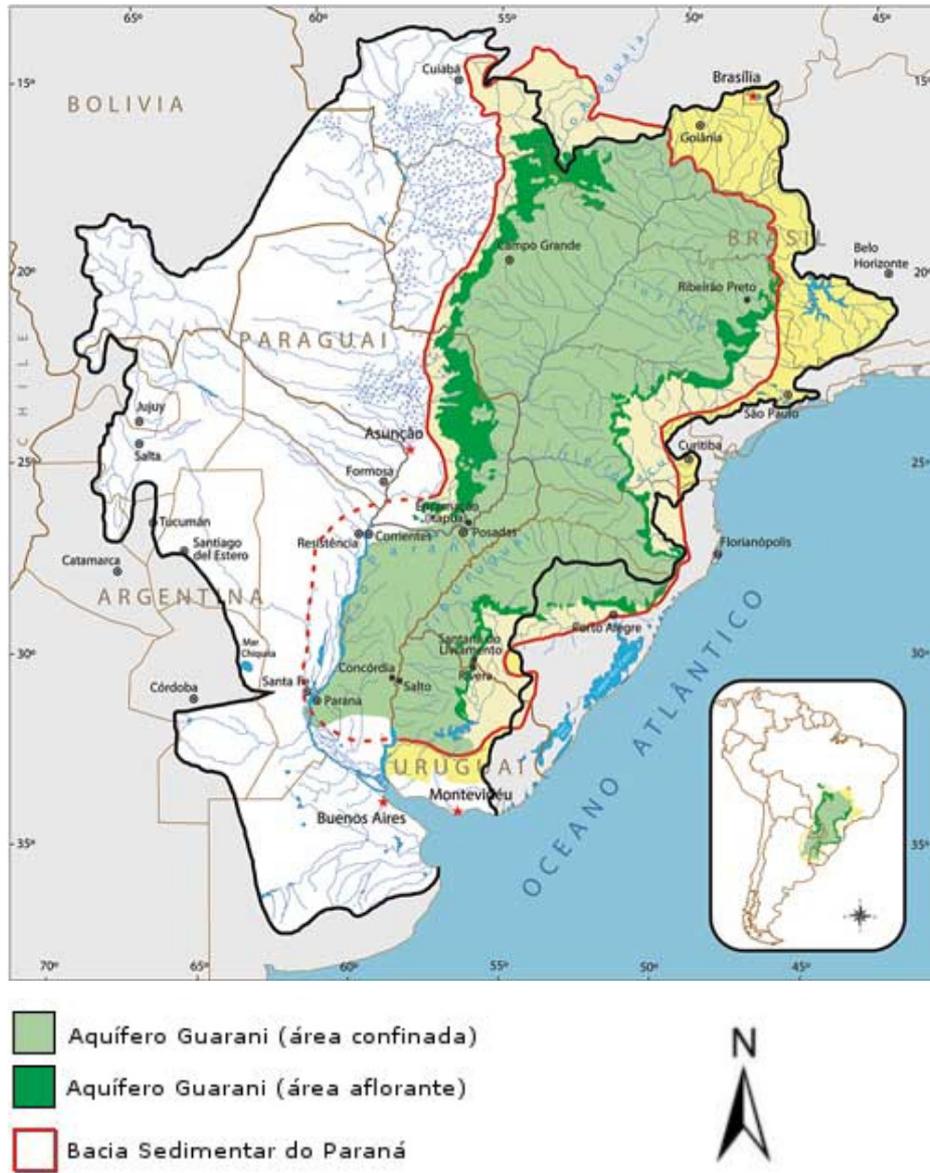


Figura 8. Localização dos afloramentos do Aquífero Guarani.

Fonte: DAE Bauru.

O Aquífero Guarani tem grande importância econômica para diversas regiões brasileiras e é uma grande fonte alternativa de abastecimento de água doce para a população mundial. Por ser constituído principalmente por arenitos, apresenta grande vulnerabilidade nas suas áreas de recarga. Portanto, entende-se que é de extrema importância a proteção de suas águas.

2.4.1 Características Geológicas

O Sistema Aquífero Guarani ocupa 75% da superfície da Bacia sedimentar do Paraná. Esta bacia coincide com a calha do Rio Paraná. As bordas estão em elevações que podem variar entre 200 metros na borda oeste até 1200 metros na borda leste.

A Bacia Sedimentar do Paraná é caracterizada como sendo uma bacia intracratônica, pois sua evolução ocorreu sobre uma área cratônica, ou seja, sua formação ocorreu sobre uma placa continental pouco deformada.

O Aquífero Guarani é composto em grande parte por rochas arenosas de deposição em ambiente fluvio-lacustre e eólico do Triássico (Formação Pirambóia) e do Jurássico (Formação Botucatu). Segundo Araújo França e Potter (1995) apud Rabelo (2006), do ponto de vista hidráulico as rochas da Formação Botucatu configuram-se como bons aquíferos por apresentarem alta permeabilidade e maior porosidade, as rochas da Formação Pirambóia são uma fonte inferior de água por apresentarem maior concentração de argila e menor porosidade.

A figura 9 ilustra a seção geológica da Bacia Sedimentar do Paraná e o fluxo previsto entre as seções geológicas típicas do Aquífero Guarani.

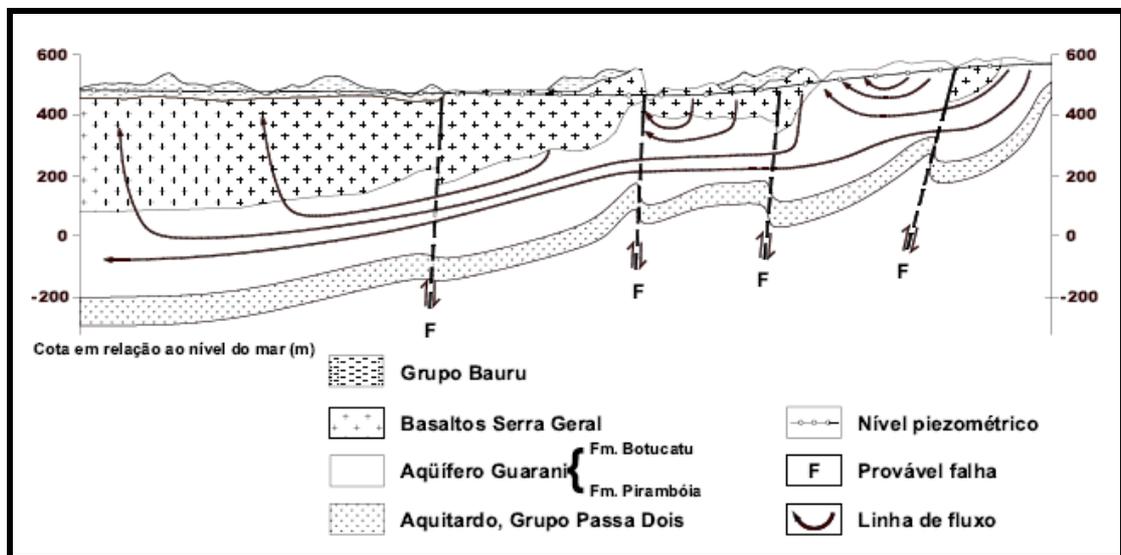


Figura 9. Seção geológica da Bacia Sedimentar do Paraná e fluxo previsto para as formações geológicas do Aquífero Guarani, na região de Ribeirão Preto – SP.

Fonte: RABELO, 2006.

De um modo geral, o Aquífero Guarani é caracterizado por uma unidade confinada de arenitos com valores elevados de condutividade hidráulica, K , que diminui com a

profundidade devido ao aumento da proporção de argilas (CAMPOS,1999 apud RABELO,2006).

2.5 CARACTERÍSTICAS DA UNIDADE HIDROGRÁFICA DE GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS TIETÊ/JACARÉ (UGRHI 13)

2.5.1 Descrição Geral

De acordo com o Comitê PCJ:

Área: 11.779 km² (CORHI – 2004)

A UGRHI-13 localiza-se na porção central do Estado. É definida pelas bacias hidrográficas de cursos d'água afluentes ao rio Tietê no trecho, de cerca de 140 km, entre as barragens das UHEs de Ibitinga e Barra Bonita, dos quais se destacam os rios Jacaré-Pepira, Jacaré-Guaçu e Jaú pela margem direita e os rios Bauru e Lençóis pela margem esquerda.

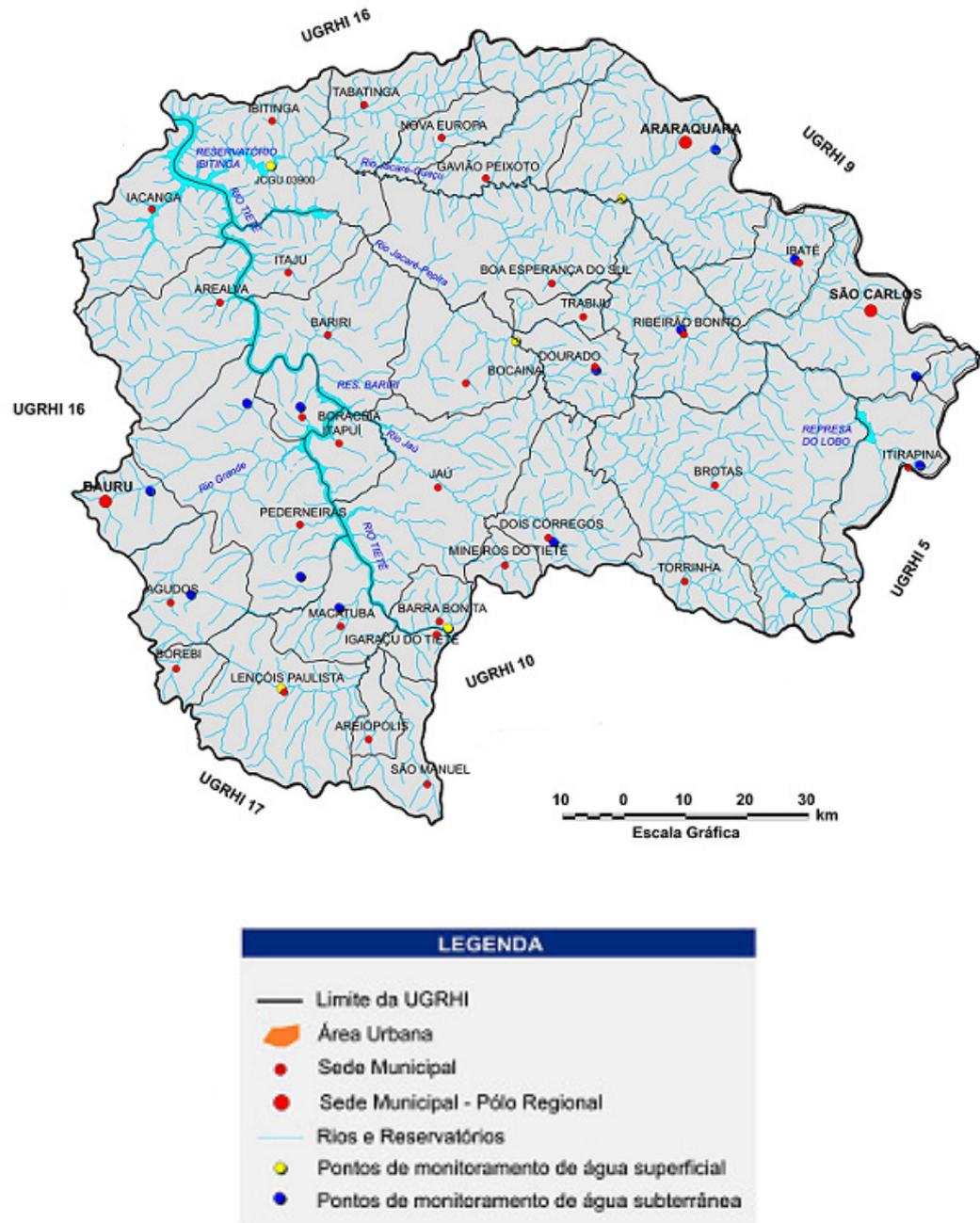


Figura 10. Divisão da UGRHI 13.

Fonte: Comitê PCJ.

As unidades geológicas que afloram na área da UGRHI são os sedimentos clásticos predominantemente arenosos, as rochas ígneas basálticas do Grupo São Bento, as rochas sedimentares do Grupo Bauru, os sedimentos cenozóicos e depósitos correlatos, pelos depósitos aluvionares associados à rede de drenagem, além dos coluviões e eluviões.

Segundo Inventário Florestal do Estado de São Paulo, realizado pela SMA (1993), a cobertura vegetal natural da Região Administrativa de Bauru exhibe os seguintes tipos de vegetação: cerradão, cerrado, várzea, capoeira e mata.

2.5.2 Conjuntura socioeconômica

Esta UGRHI chegou a uma população de 1.268.800 habitantes em 2000. Dentre seus municípios, os de maior população são pela ordem: Bauru, São Carlos, Araraquara e Jaú; juntas concentram cerca de 61% da população total da Unidade de Gerenciamento. Em particular Bauru, com mais de 300 mil habitantes, figura entre os 20 municípios com maior população do Estado e é o pólo regional principal da UGRHI. Mas São Carlos e Araraquara também têm relevante influência na região, porque concentram importantes centros de formação universitária.

A agroindústria tem importante participação regional na UGRHI, principalmente pelas grandes usinas de álcool e açúcar instaladas próximas a Araraquara e Jaú, porém a implantação de novos ramos de atividade vem mudando o perfil industrial da região. Essa mudança é perceptível, principalmente em São Carlos, onde estão se instalando indústrias de grau tecnológico mais elevado. A agricultura e pecuária também são atividades relevantes.

2.5.3 Águas superficiais

Os totais anuais médios de chuvas na UGRHI variam de 1.200 a 1.600 mm. A produção hídrica superficial, dentro dos limites territoriais da UGRHI, apresenta as seguintes vazões características (PERH 2004-2007):

- QLP (vazão média) = 97 m³/s
- Q7,10 (vazão mínima média de 7 dias consecutivos e 10 anos de período de retorno) = 40 m³/s.

Os principais reservatórios da UGRHI são os das UHEs de A. Souza Lima (Bariri) e Ibitinga, implantados no rio Tietê, que totalizam um volume útil de 114 hm³.

A situação geral da qualidade dos seus recursos hídricos superficiais é apresentada a seguir na figura 11, em termos de distribuições percentuais do Índice de Qualidade de Água para fins de Abastecimento Público - IAP e do Índice de Qualidade da Água para Proteção da Vida Aquática - IVA, referentes ao ano de 2003.

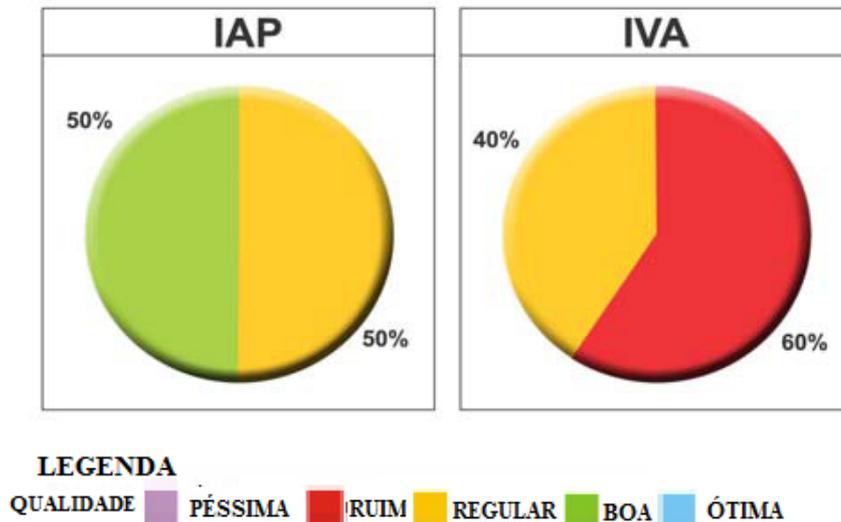


Figura 11. Distribuições Percentuais de IAP e IVA em 2003.

Fonte: Relatório de Qualidade das Águas Interiores do Estado de São Paulo – 2003, CETESB/2004.

2.5.4 Águas subterrâneas

Quatro unidades aquíferas se destacam na UGRHI, a saber: Aquífero Cenozóico, Sistema Aquífero Bauru, Aquífero Serra Geral e Aquífero Botucatu, em suas porções livre e confinada. Não há, no Relatório Zero, estimativas de reservas explotáveis de água subterrânea na região da UGRHI.

Atualmente, a rede de monitoramento das águas subterrâneas é composta por 146 poços tubulares profundos em todo o Estado. Destes, 14 localizam-se na UGRHI em tela; destes 7 estão situados no Aquífero Botucatu em condições de confinamento, 4 no Aquífero Botucatu livre e 3 poços no Aquífero Serra Geral.

Segundo o Relatório de Qualidade das Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo 2001- 2003, CETESB/abril de 2004, de modo geral, as águas captadas no Sistema Aquífero Guarani apresentam qualidade boa para consumo humano. Entretanto, observou-se elevada concentração de boro em Agudos; ferro em Araraquara e Itirapina e manganês nos municípios de Dois Córregos e Macatuba.

2.5.5 Demandas

A estimativa das demandas (fontes superficiais e subterrâneas) em 2004, efetuada no âmbito do PERH 2004-2007, chegou nos seguintes resultados:

Tabela 3. Estimativa das demandas (fontes superficiais e subterrâneas) em 2004.

Fonte: Comitê PCJ.

Categoria de Uso	Demanda (m³/s)
Urbano	4,53
Industrial	7,55
Irrigação	10,51
Total	22,69

2.5.6 Principais problemas apontados no plano de bacia/relatório zero

O Relatório de Situação dos Recursos Hídricos do Estado de São Paulo – Relatório Zero – 1999, aponta os problemas desta UGRHI, destacando dentre eles:

- Elevadas demandas de água devidas à irrigação e ao setor sucro alcooleiro, principalmente no médio Jacaré- Guaçú e ribeirão dos Lençóis;
- Riscos de rebaixamento acentuado da superfície do lençol subterrâneo nas áreas urbanas de Bauru e Araraquara;
- Risco de poluição das águas subterrâneas nas regiões de Bauru, Araraquara, Brotas e arredores;
- Baixo índice de cobertura de tratamento de esgotos;
- Média a alta suscetibilidade a inundações nas sub-bacias dos rios Jacaré-Guaçú e Jacaré-Pepira, com agravamento nas áreas urbanizadas;
- Muito alta suscetibilidade a erosão nas regiões noroeste e sudeste da UGRHI.

2.6 Distribuição das Principais Unidades Geológicas nas Sub-Bacias da UGRHI-13

De acordo com o Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos de São Paulo, a tabela 4 apresenta a distribuição percentual em área das principais formações geológicas por sub-bacia da UGRHI-TJ . A figura 16 apresenta a distribuição espacial destas formações na UGRHI-13.

Observa-se que na sub-bacia 1, ocorrem, basicamente, as Formações Vale do Rio do Peixe (55,1%) e Serra Geral (33,0%). Na sub-bacia 2, também predominam as Formações Serra Geral (56,3%) e Vale do Rio do Peixe (34,8%). Na sub-bacia do Rio Bauru (3), ocorrem três unidades geológicas representadas pelas Formações Vale do Rio do Peixe (58,5%), Marília (27,7%) e Serra Geral (13,6%). Na sub-bacia 4, predominam as Formações Vale do Rio do Peixe (52,4%), Botucatu (23,9%) e Serra Geral (13,6%). Na sub-bacia do Médio Jacaré-Guaçu (5), ocorrem, principalmente, as Formações Botucatu (33,0%), Serra Geral (27,6%), Vale do Rio do Peixe (18,2%). A Formação Pirambóia (9,6%) e as Coberturas da Serra de Santana (8,4%) também apresentam áreas expressivas nesta sub-bacia. Na sub-bacia 6, predominam as Formações Botucatu (54,1%) e Serra Geral (21,7%), além das Coberturas da Serra de Santana (13,7%). Na sub-bacia 7, também predominam as Formações Botucatu (58,0%) e Serra Geral (17,1%), além de ocorrências das Formações Itaqueri (10,2%) e Vale do Rio do Peixe (8,9%). Na sub-bacia 8, predominam as Formações Botucatu (51,2%), Itaqueri (30,5%) e Serra Geral (16,1%). Finalmente, na sub-bacia 9 (Rio Jaú), ocorrem duas unidades geológicas, representadas pelas Formações Itaqueri (50,2%) e Serra Geral (48,8%).

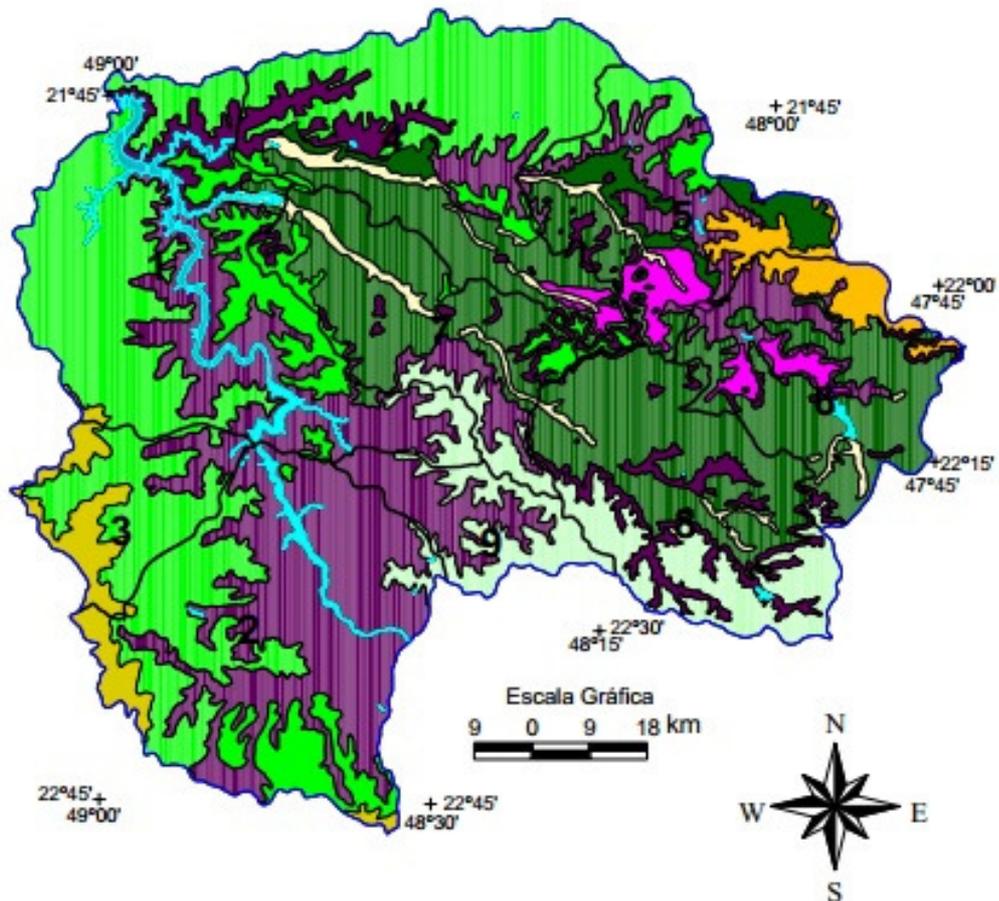
Tabela 4. Distribuição percentual em área das unidades geológicas por sub-bacia da UGRHI-13.

Fonte: Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos de São Paulo.

SUB-BACIA	UNIDADES GEOLÓGICAS (% DA ÁREA DAS SUB-BACIAS)								LAGOS (%)
	Qa(*)	TQi	KTi	Km	Ka	JKsg	JKb	TrJp	
1 – Rio Tietê/Rio Claro	0,5	0,0	3,6	0,5	55,1	33,0	1,1	0,0	6,2
2 – Rio Tietê/Rio Lençóis	0,0	0,0	1,8	5,3	34,8	56,3	0,0	0,0	1,8
3 – Rio Bauru	0,0	0,0	0,0	27,7	58,5	13,6	0,0	0,0	0,3
4 – Baixo Jacaré-Guaçu	4,6	0,0	0,0	0,0	52,4	16,8	23,9	2,1	0,1
5 – Médio Jacaré-Guaçu	3,2	8,4	0,0	0,0	18,2	27,6	33,0	9,6	0,1
6 – Alto Jacaré - Guaçu	2,3	13,7	0,9	0,0	0,0	21,7	54,1	6,8	0,5
7 – Baixo-Médio Jacaré-Pepira	5,9	0,0	10,2	0,0	8,9	17,1	58,0	0,0	0,0
8 – Alto Jacaré-Pepira	2,1	0,0	30,5	0,0	0,0	16,1	51,2	0,0	0,1
9 – Rio Jaú	0,0	0,0	50,2	0,0	0,0	49,8	0,0	0,0	0,0

(*) Qa– Sedimentos Aluvionares; TQi- Coberturas da Serra de Santana; Kti– F. Itaqueri; Km- F. Marília; Ka- F. Adamantina (Vale do Rio do Peixe); JKsg- F. Serra Geral; JKb – F. Botucatu; e TrJp- F. Pirambóia.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO TIETÊ - JACARÉ - CBH - TJ
FEHIDRO - IPT



LEGENDA

- Limite da UGRHI-TJ
- Sub-bacias
- Lagos/Reservatórios
- Unidades Geológicas
- Sedimentos Aluvionares
- Coberturas da Serra de S. Carlos
- F. Itaqueri
- F. Marília
- F. Adamantina (V. do R. do Peixe)
- F. Serra Geral
- F. Botucatu
- F. Pirambóia

SUB-BACIAS DA UGRHI 13

- 1- Rio Tietê/Rio Claro
- 2- Rio Tietê/Rio Lençóis
- 3- Rio Bauru
- 4- Baixo Jacaré-Guaçu
- 5- Médio Jacaré-Guaçu
- 6- Alto Jacaré-Guaçu
- 7- Baixo-Médio Jacaré-Pepira
- 8- Alto Jacaré-Pepira
- 9- Rio Jaú

Figura 12. Mapa geológico simplificado com a distribuição das principais unidades geológicas nas sub-bacias da UGRHI-13.

Fonte: Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos de São Paulo, 2013.

2.7 GEOMORFOLOGIA

De acordo com o Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos de São Paulo, a UGRHI do Tietê-Jacaré está inserida na Província Geomorfológica do Planalto Ocidental Paulista e das Cuestas Basálticas, segundo a subdivisão geomorfológica do Estado de São Paulo (IPT, 1981c).

2.7.1 Considerações sobre as Fontes de Dados

As características do relevo regional da Bacia do Tietê-Jacaré foram levantadas a partir de duas importantes referências bibliográficas: Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo, escala 1:1.000.000 (IPT, 1981c apud Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos de São Paulo), e Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo, escala 1:500.000 (ROSS & MOROZ, 1997 apud Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos de São Paulo). No primeiro trabalho, os compartimentos geomorfológicos foram definidos a partir de sistemas de relevo (unidades do relevo e os elementos que compõem as unidades) e, no segundo, a delimitação dos compartimentos está baseada na aplicação dos conceitos de morfoestrutura e morfoescultura como suporte técnico-conceitual para a análise morfogenética.

Para a apresentação do Mapa Geomorfológico da Bacia foram considerados os limites do mapa de sistemas de relevo (IPT 1981c apud Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos de São Paulo), mencionando-se na legenda os aspectos da análise morfogenética que complementam a caracterização geral do relevo.

De acordo com o Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos de São Paulo ocorrem as seguintes Províncias Geomorfológicas:

2.7.2 Planalto Ocidental

Este Planalto, definido como uma das províncias geomorfológicas do Estado de São Paulo por Almeida (1964) apud Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos de São Paulo corresponde, geologicamente, aos derrames basálticos que cobrem as unidades

sedimentares do final do ciclo de deposição da Bacia do Paraná e às coberturas sedimentares que, por sua vez, foram depositadas na Bacia Bauru, acima desses basaltos.

Caracteriza-se por apresentar um relevo “monótono”, levemente ondulado, de colinas. A densidade de drenagem apresenta fortes variações entre os sistemas de relevo reconhecidos e até mesmo no interior de um mesmo sistema. De modo geral, as cabeceiras de curso d’água exibem uma maior ramificação da drenagem e, conseqüentemente, densidades médias até altas.

O Planalto Ocidental abrange apenas parte da Bacia, sendo mais expressivo ao longo do extremo oeste da URGHI-TJ, onde ocorrem as formações Marília (setores restritos) e Vale do Rio do Peixe, que também aparece no extremo norte da área da Bacia.

2.7.3 Cuestas Basálticas

Esta província geomorfológica apresenta-se sob a forma de diversos planaltos e transições interplanálticas que correspondem às cabeceiras dos rios Jacaré-Pepira e Jacaré-Guaçu, configurando um vasto interflúvio, que avança sobre a Depressão Periférica. Embora não delimitados no mapa geomorfológico, são assim caracterizados:

- a) Planalto de Torrinha: abrange a área do município de Torrinha e está modelado sobre basaltos, com extensa cobertura de rochas da Formação Itaqueri, configurando um relevo de colinas médias. As altitudes variam entre 700 m e 900 m;
- b) Planalto de São Carlos: abrange a região de São Carlos e Ibaté e também está modelado sobre basaltos, embora sua cobertura sedimentar seja considerada mais jovem que a Formação Itaqueri. Configura um relevo de morros arredondados e colinas médias.

Quanto à constituição litológica, tem-se que esta província é dominada por derrames de rochas eruptivas básicas, sobrepostos, extensos de várias dezenas até mais de uma centena de quilômetros, e espessos de várias dezenas de metros. Os derrames recobriram depósitos das formações Pirambóia e Botucatu, basicamente formados por arenitos de origem predominantemente eólica. Lentes de arenitos eólicos, sobre os basaltos, encontram-se muitas vezes intercaladas nos derrames.

Em relação às características da rede de drenagem destaca-se o Rio Tietê de grande importância para a bacia. Segundo Almeida (1964) apud Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos de São Paulo, o Rio Tietê é um curso d’água primitivo conseqüente, ou

seja, seu eixo principal tem a mesma direção do caimento das camadas rochosas. Seu traçado foi evoluindo com o tempo, conforme a resistência do substrato litológico, evolução das cabeceiras e “de epigênese imposta pelo soerguimento epirogênico, fenômeno marcante no trecho em que atravessa a província das cuestas. Os rios Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira destacam-se como importantes afluentes do Tietê. Quanto às formas de origem fluvial verificam-se junto a estes cursos d’água planícies fluviais e baixos terraços relativamente extensos, causados por acumulações a montante de soleiras basálticas. No caso do Tietê, essas formas não mais se observam, pois essas mesmas soleiras foram locais privilegiados para a implantação de barragens.

2.7.4 Sistemas de Relevo Presentes na UGRHI 13

De acordo com o Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos de São Paulo ocorrem os seguintes sistemas de relevo nas duas províncias geomorfológicas descritas anteriormente:

a) Planícies Fluviais (111): as planícies são terrenos planos, de natureza sedimentar fluvial quaternária, geradas por processos de agradação (deposição de sedimentos), que correspondem às áreas sujeitas a inundações periódicas. Os terraços fluviais também são áreas planas ou levemente inclinadas, poucos metros mais elevados que as planícies fluviais e, portanto, quase sempre livre de inundações. As planícies fluviais apresentam declividades inferiores a 2% e posicionam-se em diferentes níveis altimétricos. São formadas por sedimentos fluviais arenosos e argilosos inconsolidados e os solos são do tipo Glei Húmico e Glei Pouco Húmico. O potencial de fragilidade destas planícies é muito alto por serem áreas sujeitas a inundações periódicas, com 33 Relatório nº 40.674 lençol freático pouco profundo e sedimentos inconsolidados sujeitos a acomodações constantes. As Planícies Fluviais são observadas em trechos dos Rios Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira;

b) Colinas Amplas (212): o sistema de relevo predominante na UGRHI corresponde às Colinas Amplas, que são observadas na maior parte das sub-bacias do Alto e Baixo Jacaré-Guaçu (onde predominam sedimentos da Formação Botucatu), Baixo/Médio Jacaré-Pepira (dispostas sobre sedimentos das formações Vale do Rio do Peixe e Botucatu) e ao longo de todas sub-bacias que envolvem diretamente o Rio Tietê, correspondendo aos sedimentos da

Formação Vale do Rio do Peixe e aos basaltos da Formação Serra Geral. Neste sistema de relevo predominam interflúvios com área superior a 4 km², topos extensos e aplainados, e vertentes com perfis retilíneos a convexos. Geralmente a drenagem é de baixa densidade e apresenta padrão subdendrítico. Os vales são abertos com presença de planícies aluviais interiores restritas, podendo ocorrer eventualmente, lagoas perenes ou intermitentes;

c) Colinas Médias (213): abrangem parte das bacias do Alto Jacaré-Pepira e as cabeceiras do Rio Jaú e correspondem aos sedimentos das formações Pirambóia e Itaqueri. Quando ocorrem na sub-bacia do Baixo Jacaré-Guaçu, correspondem aos sedimentos da Formação Vale do Rio do Peixe e aos basaltos da Formação Serra Geral. Suas características principais identificam interflúvios com áreas de 1 a 4 km², topos aplainados, vertentes com perfis convexos a retilíneos. Drenagem de média a baixa densidade, padrão sub-retangular, vales abertos a fechados, planícies aluviais interiores restritas, presença eventual de lagoas perenes ou intermitentes;

d) Morros Amplos (221): relevo característico da sub-bacia do Médio Jacaré-Guaçu, estando associado às formações Pirambóia, Botucatu, Serra Geral e Itaqueri. Neste sistema de relevo os interflúvios apresentam área superior a 15 km², com topos arredondados a achatados. As vertentes apresentam perfis retilíneos a convexos. Drenagem de baixa densidade, padrão dendrítico, vales abertos, planícies aluviais interiores restritas;

e) Morrotes Alongados e Espigões (234): ocorrem localmente na Bacia, destacando-se em determinadas áreas do extremo sudoeste, associados à Formação Marília (sedimentos mais resistentes). Também ocorrem em certas porções junto ao Rio Tietê, próximo ao município de Bariri, na sub-bacia do Rio Jaú e nas cabeceiras do Rio Lençóis, associados a litologias diversas (formações Vale do Rio do Peixe, Serra Geral, Botucatu e Itaqueri). Normalmente, predominam interflúvios sem orientação preferencial, topos angulosos a achatados, vertentes ravinadas com perfis retilíneos. Drenagem de média a alta densidade, padrão dendrítico, vales fechados; 34 Relatório nº 40.674;

f) Morros Arredondados (241): ocorrem localmente em algumas cabeceiras de tributários do Rio Jacaré-Guaçu e estão associados aos sedimentos das formações Itaqueri e Botucatu. São constituídos de topos arredondados e localmente achatados, vertentes com

perfis convexos a retilíneos, localmente ravinados. Exposições locais de rocha. Presença restrita de espigões curtos. Drenagem de média densidade, padrão dendrítico a subdendrítico, vales fechados;

g) Mesas Basálticas (311): ocorrem em setores restritos do Médio/Baixo Jacaré-Guaçu e Alto Jacaré-Pepira e estão associados à Formação Pirambóia. As mesas basálticas são representadas por morros testemunhos isolados (peões e baús), topos aplainados a arredondados, vertentes com perfis retilíneos, muitas vezes com trechos escarpados e exposições de rocha. Drenagem de média densidade, padrão pinulado a subparalelo, vales fechados;

h) Encostas Sulcadas por Vales Sub-paralelos (511): ocorrem restritamente no município de São Carlos na região das nascentes do Rio Jacaré-Guaçu. Caracterizam-se por interflúvios lineares, de topos angulosos a arredondados e vertentes de perfis retilíneos. Drenagem de média densidade, padrão subparalelo a dendrítico, vales fechados;

i) Encostas não Escarpadas com Canions Locais (512): ocorrem restritamente na sub-bacia do Alto Jacaré-Guaçu. Caracterizam-se por vertentes com perfis retilíneos a convexos e trechos escarpados. Drenagem de média densidade, padrão pinulado, vales fechados, localmente formando canions, vales principais com fundos chatos;

j) Escarpas Festonadas (521): correspondem aos basaltos da Formação Serra Geral e ocorrem ao longo da margem esquerda do Rio Jacaré-Pepira (desde Santa Clara, no município de Brotas, até Pedro Alexandrino, no município de Bocaina). Apresentam-se desfeitas em anfiteatros separados por espigões, topos angulosos, vertentes com perfis retilíneos. Drenagem de alta densidade, padrão subparalelo a dendrítico, vales fechados.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO TIETÊ -JACARÉ - CBH - TJ
FEHIDRO - IPT

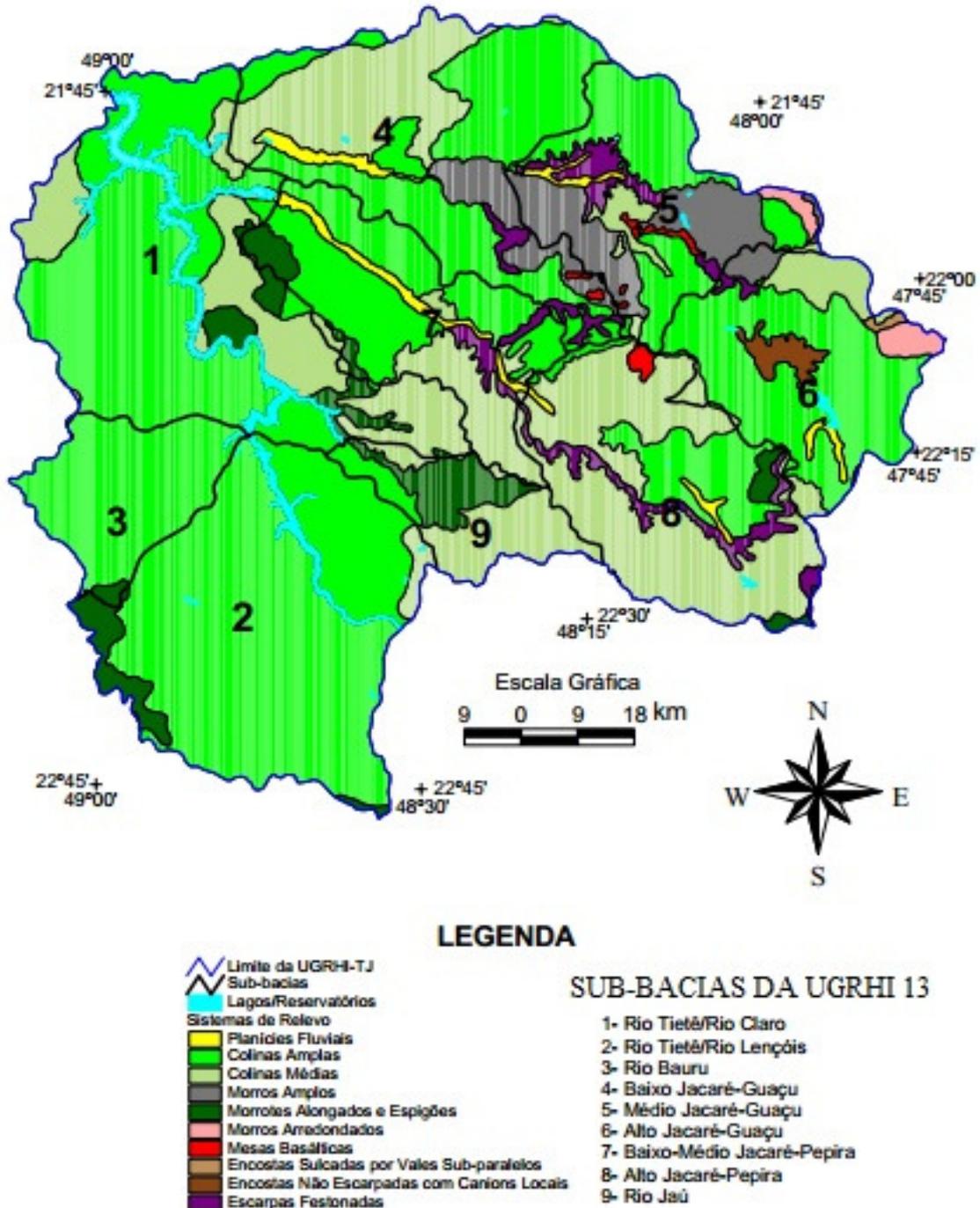


Figura 13. Mapa geomorfológico simplificado apresentando a distribuição dos principais sistemas de relevo nas sub-bacias da UGRHI-13.

Fonte: Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos de São Paulo, 2013.

2.8 PEDOLOGIA

2.8.1 Considerações sobre as Fontes de Dados

A caracterização das classes pedológicas encontradas na porção da UGRHI Tietê-Jacaré situada a oeste do paralelo 48° realizou-se com base nos levantamentos executados pelo PROJETO RADAMBRASIL (Secretaria Geral, Ministério de Minas e Energia), folhas SF-23/24 – Rio de Janeiro/Vitória (Volume 32), publicados em 1983 em escala 1:1.000.000. Para o restante da área (a leste do paralelo 48°) também foram utilizados os levantamentos do mesmo projeto, porém ainda não publicados e portanto os dados foram coletados a partir do Mapa Pedológico 1:500,000 (Relatório IPT 26.989, de 1988 apud Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos de São Paulo). Vale salientar que foram utilizadas as bases originais que foram elaboradas em escala 1:250.000.

2.8.2 Unidades Pedológicas da UGRHI – 13

De acordo com o Relatório IPT 26.989, 1988 apud Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos de São Paulo, os solos da UGRHI-13, analisados do ponto de vista do desenvolvimento pedológico, no que se refere à profundidade e à organização do perfil, formam dois conjuntos principais, a saber:

a) solos pedologicamente desenvolvidos: caracterizados por apresentarem horizontes superiores com alteração pronunciada dos minerais originais e desenvolvimento pedogenético bastante influenciado pelas condições climáticas da região, com tendência à latossolização ou podzolização dos perfis. Estes solos, com horizonte B latossólico ou com horizonte B textural, são representados pelas associações pedológicas de Latossolo Roxo, Latossolo Vermelho-Escuro, Latossolo Vermelho-Amarelo; Terra Roxa Estruturada e Podzólico Vermelho-Amarelo;

b) solos caracterizados por apresentar alteração incompleta dos minerais constituintes do substrato pedogenético, cujo desenvolvimento condiciona-se a situações específicas do meio em que se encontram, tais como: ambientes com drenagem interna deficiente, áreas de

alta declividade, planícies fluviais e substrato essencialmente quartzoso. Os principais solos com estas características, encontrados na área da Bacia são: Areias Quartzosas, Planossolos e Litólicos, além dos Hidromórficos, não passíveis de serem representados na escala 1:250.000.

Os tipos de solos estão diretamente relacionados ao relevo regional e ao substrato rochoso. Esta influência manifesta-se através da interação entre as formas de relevo e a dinâmica da água. Assim, em relevos de colinas e planícies, há uma tendência à infiltração da água onde, ao entrar em contato com o substrato, favorecerá o desenvolvimento de solos mais profundos (Latosolos), enquanto que em relevos de alta declividade, a ação do escoamento superficial sobrepõe-se à infiltração, levando à formação de solos rasos (Litólicos). Também é grande a correspondência entre as características texturais e mineralógicas dos perfis de solo com a composição do substrato geológico, evidenciando a influência deste fator nos processos de desenvolvimento pedológico, conforme destacado a seguir:

a) tendência geral de desenvolvimento de perfis latossólicos em superfícies aplainadas e de boa drenagem interna, e de perfis podzólicos em vertentes de maior declividade. Áreas de ocorrência de latossolos distribuem-se, preferencialmente, em relevos de colinas amplas associadas a planaltos, enquanto que os podzólicos ocorrem em relevos de transição interplanáltica, caracterizados por colinas médias;

b) ocorrência predominante de Latossolo Roxo, Terra Roxa Estruturada e Latossolo Vermelho-Escuro, com características de textura argilosa a muito argilosa, resultantes da decomposição de rochas basálticas da Formação Serra Geral, distribuídas nas províncias geomorfológicas das Cuestas Basálticas e Depressão Periférica. As Areias Quartzosas distróficas mantêm íntima subordinação com arenitos da Formação Botucatu, conforme pode ser constatado em extensa área entre São Carlos e Itirapina, no extremo leste da Bacia;

c) diferenciação no teor de ferro dos minerais constituintes do substrato rochoso: perfis de latossolos e podzólicos quando de coloração vermelho escura resultam, em geral, de rochas ricas em ferro (rochas básicas da Formação Serra Geral) ou de outras rochas em zonas de contato com esta Formação, caso contrário adquirem coloração amarelada (rochas das Formações Botucatu, Pirambóia e Itaqueri). Perfis de solos provenientes de rochas das formações areníticas do Grupo (Bacia) Bauru (formações Marília e Vale do Rio do Peixe –

oeste da UGRHI - 13), apresentam coloração vermelho escura nos latossolos e coloração vermelho-amarela nos podzólicos. Provavelmente, essa tendência deve-se aos processos pedogenéticos de desenvolvimento desses solos, conduzindo a uma maior acumulação de sesquióxidos de ferro nos latossolos, em relação aos podzólicos.

Considerando estas características, observam-se seis grandes grupos de solos na UGRHI do Tietê-Jacaré, descritos a seguir:

a) Latossolo Roxo e Terra Roxa Estruturada: correspondem a solos com horizonte B latossólico (espesso e homogêneo) e coloração vermelha. A textura argilosa e muito argilosa deve-se à pedogênese sobre materiais de alteração de rochas básicas da Formação Serra Geral. O Latossolo Roxo ocorre em relevos de colinas amplas, em ambiente que favorece a lixiviação de bases e apresenta alto teor de óxidos de ferro; enquanto que a Terra Roxa Estruturada está associada a relevos mais movimentados (colinas médias/ serras), geralmente, em áreas de cabeceiras de drenagem ou próximas aos fundos de vales. São solos argilosos a muito argilosos, com alto teor de óxidos de ferro e distinguem-se do Latossolo Roxo por apresentarem certa concentração de bases nos horizontes inferiores e estruturas favoráveis à mecanização agrícola e suscetíveis à compactação, recomendando-se a redução do tráfego de veículos, além de se evitar a aração e a subsolagem, quando o solo estiver muito úmido;

b) Latossolo Vermelho-Escuro textura média e Latossolo Vermelho-Amarelo textura média: são solos semelhantes aos anteriores prismática (ou em blocos) bem desenvolvida, enquanto que o Latossolo Roxo mostra-se com estrutura granular e micro-agregada. O Latossolo Roxo, por ser profundo, muito poroso e de textura homogênea ao longo do perfil, torna-se mais resistente à erosão; são sol, diferenciando-se, principalmente, pela constituição granulométrica mais arenosa. Distribuem-se em extensas áreas de relevo pouco movimentado, constituído por colinas amplas, ou nos topos aplainados de relevos mais movimentados, como as colinas médias e os morros;

c) Podzólico Vermelho-Amarelo abrupto e não abrupto textura média: compreendem solos minerais não hidromórficos, com horizonte B textural. São solos bem a moderadamente drenados e relativamente profundos. A relação textural entre os horizontes superiores é 42 Relatório nº 40.674 muito variável, observando-se áreas com predominância de solos com baixa gradiência textural;

d) Areias Quartzosas: são solos arenosos, pedologicamente pouco desenvolvidos, constituídos, essencialmente, por minerais de quartzo, excessivamente drenados, profundos e com estruturação muito frágil. O desenvolvimento desses solos é muito influenciado pelo substrato arenítico pobre em minerais ferromagnesianos, limitando-se, dessa forma, a áreas de ocorrência das formações Botucatu e Pirambóia;

e) Solos Litólicos e Cambissolos: os solos Litólicos caracterizam-se por serem pouco desenvolvidos e apresentarem pequena espessura, normalmente com 20 a 40 cm de profundidade. Os Cambissolos constituem-se de solos com horizonte B incipiente, apresentando certo grau de evolução, porém não suficiente para alterar completamente os minerais primários de fácil intemperização, como feldspatos e micas. Na UGRHI – 13, estes solos encontram-se associados e condicionados a relevos muito movimentados, em vertentes de alta declividade. Ocorrem, principalmente, associados a relevos de escarpas e serras restritas, subordinadas às diferentes litologias existentes;

f) Planossolos: Solos que apresentam horizonte B textural, mudança textural abrupta entre os horizontes superficial e subsuperficial, horizonte superficial de textura arenosa ou média e subsuperficial de textura argilosa. São solos que geralmente ocorrem nos terraços de rios ou riachos, no terço superior da vertente, portanto, podem apresentar ou não hidromorfismo.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO TIETÊ - JACARÉ - CBH - TJ
FEHIDRO - IPT

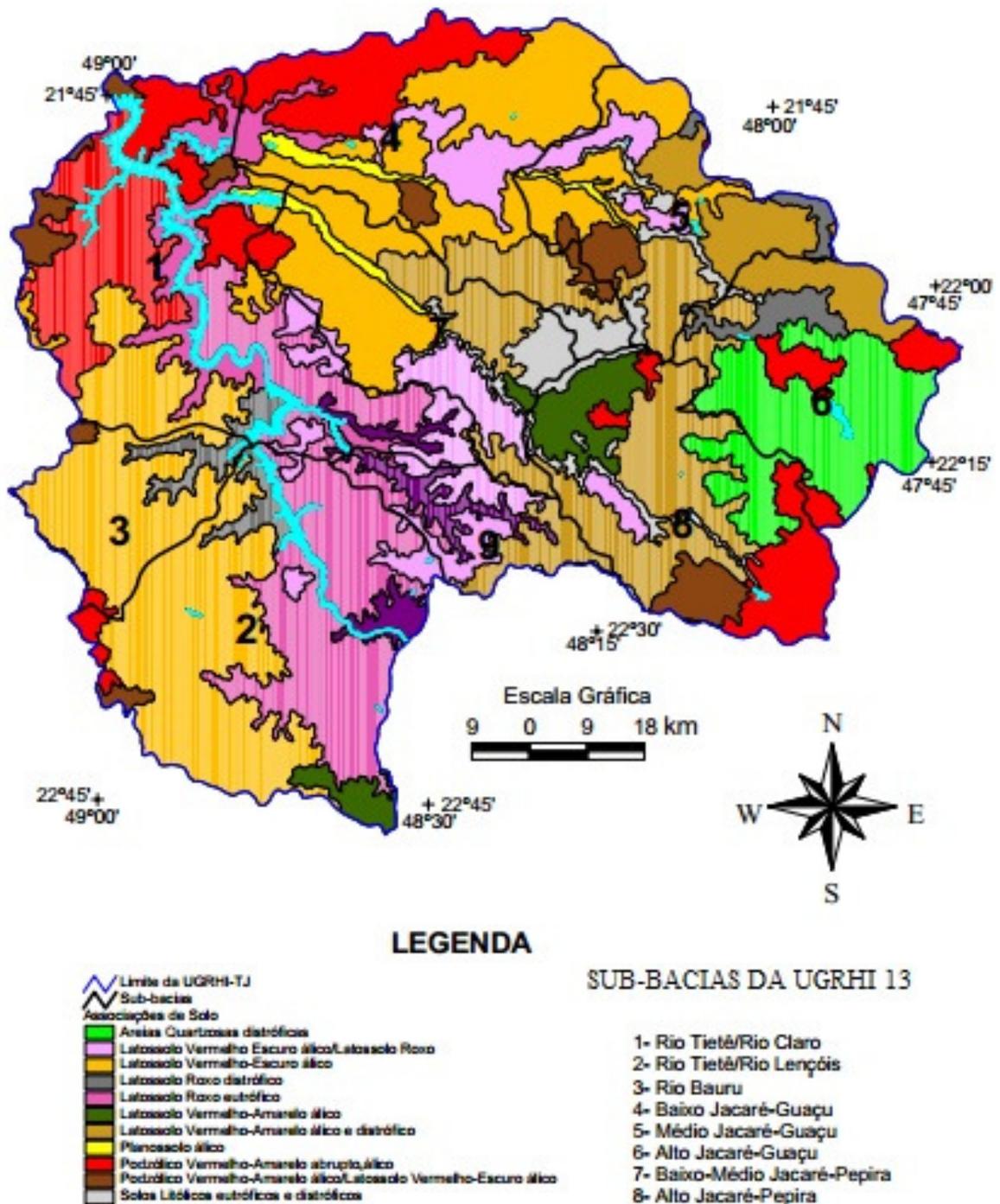


Figura 14. Mapa pedológico simplificado apresentando a distribuição das principais associações de solo nas sub-bacias da UGRHI-13.

Fonte: Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos de São Paulo, 2013.

2.9 CLIMATOLOGIA

De acordo com Setzer (1966) apud Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos de São Paulo, com base na classificação climática proposta por Köeppen, existem na UGRHI - 13 dois tipos climáticos (Quadro 1), com domínio do tipo Cwa e pequenas áreas de ocorrência do Cwb:

a) o clima Cwa é quente e úmido, com inverno seco. Apresenta no mês mais seco totais de chuvas inferiores a 30 mm; temperaturas médias superiores a 22°C no mês mais quente, e temperaturas menores que 18°C, no mês mais frio;

b) Cwb é temperado úmido com estação seca. Os totais de chuvas no mês mais seco são menores que 30 mm; a temperatura média no mês mais quente é inferior a 22°C e, no mês mais frio, é menor que 18°C.

Quadro 1. Classificação climática segundo Köeppen.

Fonte: Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos de São Paulo.

Tipo Climático	Símbolo	Total de chuva no período seco	Temperatura média (°C) no mês mais quente	Temperatura média (°C) no mês mais frio
Quente com inverno seco	Cwa	Menos de 30 mm	Acima de 22 °C	Abaixo de 18 °C
Temperado com inverno seco	Cwb	Menos de 30 mm	Abaixo de 22 °C	Abaixo de 18 °C

Na UGRHI do Tietê-Jacaré, como na maior parte do Estado, o período mais chuvoso ocorre entre outubro a março, sendo o trimestre mais chuvoso de dezembro a fevereiro. O período seco vai de abril a setembro, com o trimestre mais seco entre junho e agosto.

2.10 O AQUÍFERO GUARANI NA ÁREA DE ESTUDO

De acordo com o Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo, o Aquífero Guarani ocorre na porção oeste do Estado de São Paulo, ocupando cerca de 76% do seu território. A leste está localizada a faixa aflorante, que se estende desde o município de Rifaina, a norte, até Fartura, ao sul. Esta faixa, com área de 16.000 km², está inserida na Depressão Periférica e apresenta largura irregular que se amplia ao longo das grandes

drenagens, como é o caso do rio Jacaré-Pepira, quando atinge o máximo de 175 km. Para oeste daquela faixa, o aquífero encontra-se confinado pelos basaltos da Formação Serra Geral, numa extensão de cerca de 174.000 km². Nesta região, as águas do Guarani abastecem cidades importantes como São José do Rio Preto, Presidente Prudente, Marília e Araçatuba.

O Aquífero Guarani aflora em 46% de toda a região de estudo (que corresponde a 2,6% de toda a área de afloramento do Aquífero), desde o extremo leste da região de Itirapina até as proximidades do reservatório de Ibitinga, expandindo-se a noroeste, com surgências a nordeste, com algumas exceções na região central do divisor das duas bacias, Serra de Dourado (RABELO, 2006).



Figura 15. Localização do Aquífero Guarani no Estado de São Paulo.

Fonte: Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo.

2.11 GEOESTATÍSTICA

A geoestatística trata as variáveis como regionalizadas, podendo, mesmo, ser considerada uma aplicação prática da Teoria das Variáveis Regionalizadas. Um ponto importante a ser destacado nessa teoria é a importância dada às relações espaciais existentes entre as observações que compõem uma amostra. A Geoestatística possibilita, também, a quantificação dos erros cometidos nas avaliações (ANDRIOTTI, 2004).

A geoestatística utiliza os dados duas vezes, primeiramente para estimar autocorrelação espacial e depois para estimar. Como todas as técnicas estatísticas, a Geoestatística baseia-se em um conceito probabilístico. Para uma aplicação segura da Geoestatística, é necessário um conhecimento prévio dos conceitos de Estatística, sendo importante que se proceda a um estudo estatístico preliminar dos dados, com a finalidade de testar se as condições exigidas para aplicar o formalismo próprio da Geoestatística estão satisfeitas.

De uma forma geral, a metodologia geoestatística procura extrair, de uma aparente aleatoriedade dos dados coletados, as características estruturais probabilísticas do fenômeno regionalizado, ou seja, uma função de correlação entre os valores situados numa determinada vizinhança e direção no espaço amostrado (LANDIM & STURARO, 2002).

As técnicas geoestatísticas podem ser usadas para descrever e modelar padrões espaciais (variografia), para prever valores em locais não amostrados (krigagem), para obter a incerteza associada a um valor estimado em locais não amostrados (variância de krigagem) e para otimizar malhas de amostragem. No caso específico de utilização da geoestatística com a finalidade de apoio à otimização de malhas de amostragem, é oportuno salientar que o erro cometido ao fazer uma avaliação com malhas de amostragem diminui com o detalhamento da malha, mas esse crescimento não é linear.

As vantagens reconhecidas da geoestatística sobre outras técnicas convencionais de predição são o estudo da variabilidade espacial (a análise de um variograma é a única técnica disponível para medir a variabilidade espacial de uma variável regionalizada), a suavização (a estimação geoestatística suaviza ou faz a regressão de valores preditos, baseada na proporção da variabilidade total da amostrada levada em conta pelas variações aleatórias; quanto maior a variabilidade da amostra, menos as observações individuais representam a sua vizinhança imediata e mais elas são suavizadas, com maior incerteza associada), o desagrupamento (ou

efeito de anular as concentrações localizadas de observações), a determinação da anisotropia (os comportamentos da variabilidade nas diferentes direções são considerados), a precisão (a krigagem fornece valores estimados sobre as áreas ou pontos a serem avaliados) e a incerteza (estimativas obtidas por meio da krigagem associam a margem de erro que acompanha a estimativa).

CAPÍTULO 3 – PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

Os procedimentos metodológicos realizados no presente trabalho estão descritos nos itens a seguir:

3.1 LEVANTAMENTO DE DADOS BIBLIOGRÁFICOS

A primeira etapa consistiu na realização do levantamento de informações em livros, teses e artigos, buscando o embasamento teórico relativo à utilização de técnicas geoestatísticas em estudos ambientais, e caracterização da área de estudo. Esse material foi coletado junto à biblioteca da Universidade Estadual Paulista – UNESP/Rio Claro, sites oficiais e acervos digitais acadêmicos.

Tanto os mapas na escala 1:10.000 (IGC,1988) como o medidor de nível d'água foram adquiridos pelo projeto junto ao CNPq.

3.2 TRABALHO DE CAMPO

Os trabalhos de campo foram realizados durante o projeto de conclusão de curso pelos alunos Fernando Sims e João Gabriel Thomaz Queluz sob orientação do Professor Doutor José Ricardo Sturaro e acompanhamento do técnico administrativo Alan de Oliveira.

Esta etapa contou com os levantamentos de campo através de furos de sondagem a trado onde foram feitos ensaios de condutividade hidráulica in situ, e das leituras da profundidade do nível d'água com um medidor de nível d'água que foram realizadas para complementar os dados extraídos das cartas topográficas.

3.3 ÍNDICE DE VULNERABILIDADE DE AQUÍFEROS – AVI

O método de determinação do índice AVI foi desenvolvido pelo National Hydrology Research Institute (NHRI), no Canadá (VON STEMPVOORT; EWERT; WASSENAAR, 1992). Este método baseia-se em dois parâmetros físicos: (1) d_i – espessura de cada camada individualizada acima da zona saturada; (2) K_i – condutividade hidráulica estimada de cada uma destas camadas. De posse destes dois parâmetros, calcula-se a resistência hidráulica c , conforme $c = \sum (d_i / K_i)$ (a somatória aplica-se para pontos com várias profundidades de camada insaturada, neste trabalho foi estabelecida apenas uma camada a 1,5m de profundidade). A relação entre a vulnerabilidade e a resistência hidráulica é apresentada no Quadro 2.

Quadro 2. Classes de vulnerabilidade do Índice AVI.

Fonte: VON STEMPVOORT, 1992.

Resistência hidráulica (anos)	Vulnerabilidade
0 – 10	Extremamente alta
10 – 100	Alta
100 – 1000	Moderada
1000 – 10000	Baixa
> 10000	Extremamente baixa

Nota-se pela definição do Índice, a necessidade da medida de dois parâmetros, que são:

3.3.1 Espessura da camada da zona insaturada

O solo pode ser estratificado de diversas formas por meio da sua compacidade, granulometria, gênese e outras. Neste projeto, tendo em vista a geologia, a gênese do solo da área e as dificuldades operacionais para estratificação do solo, adotou-se, em função da homogeneidade do meio físico, um único estrato até a zona saturada.

3.3.2 Permeabilidade da camada

3.3.2.1 Permeâmetro de Guelph

O Permeâmetro de Guelph é um instrumento de fácil manipulação para medida in situ da condutividade hidráulica de maneira rápida e acurada. O equipamento pode ser transportado, montado e operado facilmente por uma pessoa (SOIL MOISTURE EQUIPMENT CORP., 1991).

O método do Permeâmetro de Guelph (PG) consiste em medir a taxa de infiltração de água no solo utilizando o princípio do sifão de Mariotte, ou seja, o ensaio é realizado com fornecimento de água sob carga hidráulica constante (SANTOS, 2005). Os ensaios de permeabilidade no solo foram realizados a partir de um furo com dimensões conhecidas de 10 cm de diâmetro e a uma profundidade de 1,5 metros.

A taxa de infiltração de água no solo torna-se constante após determinado tempo de estabilização, a estabilização está diretamente relacionada com fatores físicos, dentre eles, a umidade, a composição e a textura do solo (MEAULO, 2004). Quando é estabelecido um nível de água constante inicia-se a formação de um “bulbo” de saturação de água na base do furo (SANTOS, 2005). A figura 16 ilustra um bulbo de saturação d’água no solo.

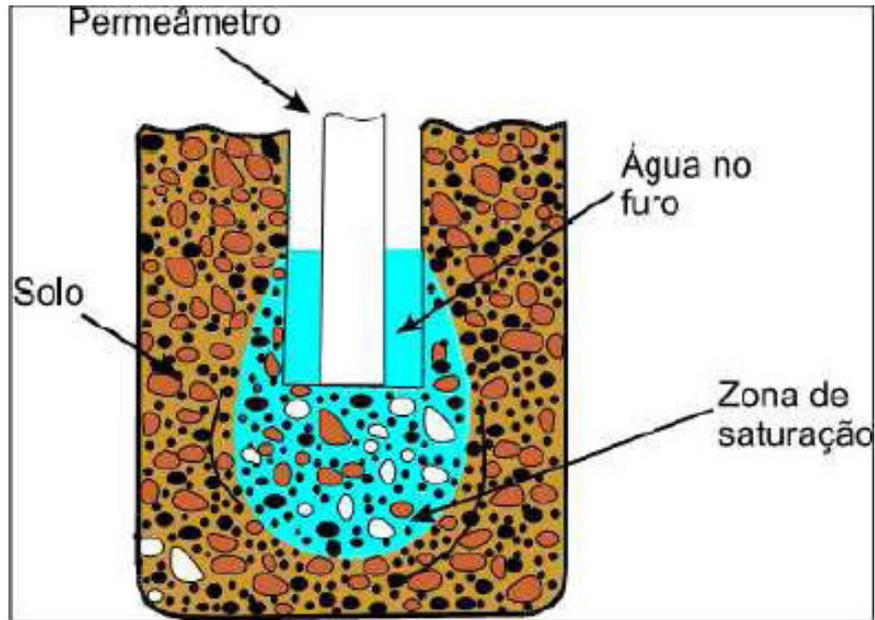


Figura 16. Bulbo de saturação d'água no solo.

Fonte: SANTOS, 2005.

O conhecimento do valor da taxa de infiltração, associado às dimensões do furo e da altura da coluna d'água em seu interior, permite o cálculo da condutividade hidráulica in situ, através da seguinte expressão, segundo Soil Moisture Corp.(1987) apud Santos, 2005:

$$K = [(0,0041)(X)(R2) - (0,0054)(X)(R1)]$$

Ou

$$K = [(0,0041)(Y)(R2) - (0,0054)(Y)(R1)]$$

Onde:

K – Condutividade hidráulica, em cm/s;

R1 e R2 - Taxas de infiltração estabilizadas correspondentes a H1 e H2 respectivamente, em cm/s;

X;Y - Constantes correspondentes a área do tubo (reservatório d'água) utilizado, em cm²;

0,0041 e 0,0054 – Valores adimensionais que podem ser obtidos através da fórmula:

$$G2 = \frac{H1C2}{\pi} [2H1H2(H2 - H1) + a^2(H1C2 - H2C1)]$$

onde,

$$G1 = G2(H2C1 / H1C2)$$

Onde:

H1;H2 – Níveis de água no furo correspondentes à primeira leitura (5 cm) e à segunda leitura (10 cm), respectivamente;

C – coeficiente de proporcionalidade que depende principalmente do tipo de solo existente no local de ensaio.

3.4 OBTENÇÃO DA SUPERFÍCIE DA COTA TOPOGRÁFICA

A partir de imagens de satélite SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), elaborou-se um mapa da cota topográfica da área de estudo através da transformação da imagem de satélite em uma malha de pontos digital. Posteriormente, utilizando o método da Mínima Curvatura no software Surfer 10, foi possível através de uma malha de 50mx50m destacar 2500 valores de cotas topográficas que permitiram a confecção do Modelo Digital do Terreno.

3.5 OBTENÇÃO DA ESPESSURA DA ZONA INSATURADA

Foram coletados, pela autora e por Thatiana Miyagui Fernandez no ano de 2011, 383 pontos de informação para as cotas de nível d'água, obtidos através de medidas efetuadas em campo com um medidor de nível d'água em “poços caipira” já existentes no local, e informações coletadas a partir dos Planos cartográficos do Estado de São Paulo na escala 1:10.000 (IGC,1988) da área.

Com os dados obtidos da maneira descrita acima e sabendo que a espessura da zona insaturada em cada ponto é a diferença entre a cota topográfica e a cota do nível d'água, o mapa da cota do nível d'água foi subtraído do mapa da cota topográfica gerando o mapa da espessura média da zona insaturada. O mapa da espessura média da zona insaturada foi obtido através da função Math do ícone Grid no software Surfer 10, utilizando-se a fórmula $d_i = MT$ (Mapa Topográfico)- MNA (Mapa do Nível d' Água).

3.6 OBTENÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DA CAMADA

Para a obtenção da condutividade hidráulica (permeabilidade) da camada insaturada foram realizados em trabalhos anteriores 50 ensaios com o Permeâmetro de Guelph como descrito no item 3.3.2.

3.7 ANÁLISES GEOESTATÍSTICAS

A análise geoestatística para o estudo ambiental a ser executado neste trabalho segue as etapas definidas verbalmente por Sturaro, 2012, elaboradas da seguinte maneira: a partir da definição da área de estudo é elaborado um levantamento das amostra georreferenciadas; é produzido o histograma das variáveis para se conhecer a forma da distribuição das mesmas; posteriormente, é realizada uma análise da variabilidade espacial por meio dos semivariogramas experimentais. São detectadas a direção de maior e menor variação espacial para a propriedade em estudo. Subsequentemente são utilizadas técnicas como a krigagem ordinária e krigagem indicativa.

3.7.1 Análise exploratória dos dados

A construção do histograma da(s) variável(eis) é essencial para a análise dos valores de tendência central, de dispersão e configuração da distribuição das classes de frequência. Assim, pode-se verificar a presença de “outliers”, a simetria da distribuição e o número de modas.

Tanto o histograma, como a curva de distribuição acumulada normal podem indicar visualmente se os dados apresentam, ou não, uma distribuição normal e, também, a eventual presença de valores anômalos (outliers). Para curvas normais os valores de assimetria (grau de afastamento da média em relação à moda e a mediana) devem estar em torno de 0 e para curtose (medida que dá o grau de achatamento da curva) em torno de 3 (LANDIM, 2003).

De acordo com Landim (2003), o uso do semi-variograma para a estimativa por krigagem não exige que os dados tenham distribuição normal, mas a presença de distribuição assimétrica, com muitos valores anômalos, deve ser levada em conta, pois a krigagem é um estimador linear.

3.7.2 Análise da variabilidade espacial

A variabilidade espacial pode ser avaliada por semivariograma, cuja expressão estatística é dada pelo momento de Inércia.

O grau de dependência de uma variável $Z(x)$ com ela mesma, separada por um vetor h , pode ser determinado pelo momento de inércia, que pode ser representado por uma função denominada de variograma. Calculando-se o momento de inércia para várias distâncias h , elabora-se um gráfico denominado de semivariograma experimental da variável $Z(x)$, que representa a variabilidade espacial das amostras (LANDIM,2003). A partir disso, as superfícies de isovalores são confeccionadas através do método da Krigagem.

3.7.3 Análise variográfica

A análise variográfica, que culmina com a modelagem, interpreta a estrutura de correlação espacial dos dados procurando quantificá-la. Com isso, pode fornecer os pesos referentes aos valores estimados para o processo estimativo da krigagem e, desse modo, controla a qualidade dos resultados (LANDIM, 2003).

Define-se variograma como a variância do erro que se comete ao estimar um teor desconhecido em $(x+h)$ pela ajuda de um ponto dado em (x) ; consideramos o variograma como a variância de estimativa de $t(x+h)$ por $t(x)$ (ANDRIOTTI, 2004).

O variograma permite a obtenção de parâmetros que descrevem o comportamento espacial das variáveis regionalizadas, conforme figura 17, onde:

- **Amplitude Variográfica (a):** A variabilidade tende a aumentar à medida que as distâncias entre os pares aumentam e tende a se estabilizar a partir de uma determinada distância. Esta distancia é denominada Amplitude Variográfica;
- **Patamar (C):** Representa o nível de variabilidade onde o variograma se estabiliza;
- **Efeito Pepita (C_0):** Representa o valor da variabilidade na distância zero. É causado por vários fatores, como erros de amostragem, erros de medidas ou microrregionalizações da variável em análise;
- A **anisotropia**, quando os semivariogramas se mostram diferentes para diferentes direções de linhas de amostragem.

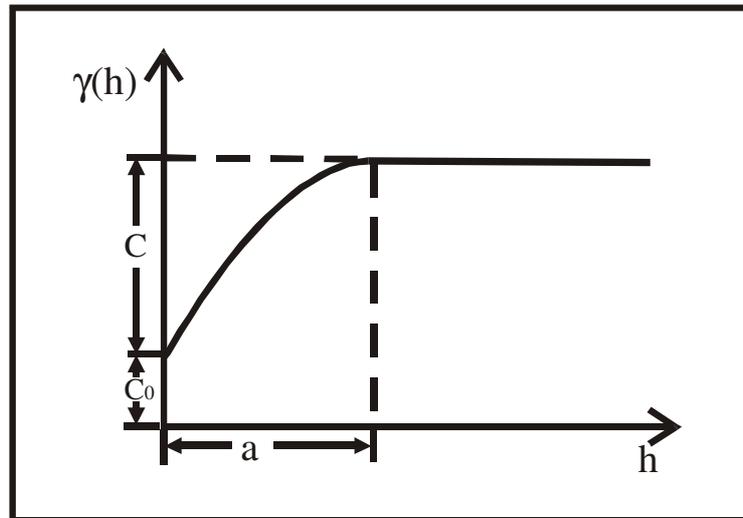


Figura 17. Esquema básico de uma função variograma.

É necessário verificar se o variograma estabiliza-se ou não em um patamar com o aumento de h , quando isto não ocorre há evidências de uma tendência dos dados e não estacionaridade do fenômeno em estudo (LANDIM & STURARO, 2002).

3.7.4 Modelos Variográficos

1) Modelo Esférico

O modelo básico mais consistente constitui-se no modelo esférico (figura 18), que possui comportamento linear na origem e é definido conforme a expressão:

$$\gamma(h) = C_0 + \begin{cases} C_1 \times 1.5 \frac{h}{a} - 0.5 \left(\frac{h}{a}\right)^3 & \text{para } h \leq a \\ C_1 & \text{para } h > a \end{cases}$$

C_0 = efeito de pepita

C_1 = componente estruturada

a = amplitude variográfica

2) Modelo Exponencial

O modelo exponencial (figura 18) possui comportamento “linear” na origem e é representado pela expressão:

$$\gamma(h) = C \left[1 - e^{-h/a} \right] + C_0, \text{ se } h \leq a$$

$$\gamma(h) = C + C_0, \text{ se } h > a$$

3) Modelo Linear

O modelo linear (figura 18) não apresenta patamar, representando um fenômeno não estacionário. É representado pela expressão:

$$\gamma(h) = C_0 + Ch^a, 0 < a < 2$$

4) Modelo Gaussiano

O modelo gaussiano (figura 18) possui comportamento parabólico na origem, sendo representado pela expressão:

$$\gamma(h) = C \left[1 - e^{-h^2/a^2} \right] + C_0, \text{ se } h \leq a$$

$$\gamma(h) = C + C_0, \text{ se } h > a$$

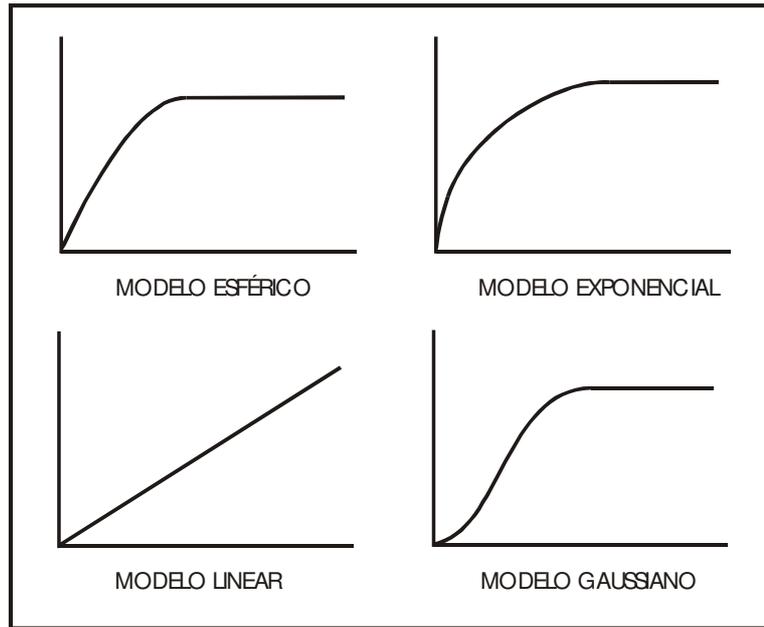


Figura 18. Representação dos modelos variográficos.

No trabalho em questão foi utilizado o modelo esférico.

3.7.5 Krigagem

A krigagem usa informações a partir do variograma para encontrar os pesos ótimos a serem associados às amostras com valores conhecidos que irão estimar pontos desconhecidos. É entendida como uma série de técnicas de análise de regressão que procura minimizar a variância estimada a partir de um modelo prévio, que leva em conta a dependência estocástica entre os dados distribuídos no espaço. É considerado o melhor estimador linear não enviesado (best linear unbiased estimator, BLUE), em que a variância da krigagem é utilizada para definir intervalos de confiança do tipo gaussiano (LANDIM & STURARO, 2002).

A qualidade essencial de uma estimativa não é simplesmente associar um valor a um ponto ou a um bloco, mas também associar a essa avaliação uma idéia da qualidade da estimativa, dimensionando o erro existente, ou seja, é necessário que se saiba quão distante o valor atribuído pode estar do valor real. A geoestatística, por intermédio da krigagem, fornece uma estimativa do ponto ou do bloco e, juntamente com ela, uma medida de acuracidade dessa estimativa (ANDRIOTTI, 2004).

A krigagem consiste na estimativa de variáveis distribuídas no espaço a partir de valores adjacentes enquanto considerados como interdependentes pelo semivariograma. Trata-se, em último caso, de um método de estimação por médias móveis.

A krigagem pode ser aplicada para:

- Previsão do valor pontual de uma variável regionalizada em um determinado local dentro do campo geométrico; é um procedimento exato de interpolação que leva em consideração todos os valores observados, e que pode ser a base para cartografia automática por computador quando se dispõe de valores de uma variável regionalizada dispostos por uma determinada área;
- Cálculo médio de uma variável regionalizada para um volume maior que o suporte geométrico, como por exemplo, no cálculo do teor médio de uma jazida a partir de informações obtidas de testemunhas de sondagens;
- Estimação do drift, de modo similar à análise de superfície de tendência.

Em todas essas situações, o método fornece, além dos valores estimados, o erro associado a tal estimativa, o que o distingue dos demais algoritmos à disposição.

3.7.5.1 Krigagem Ordinária

A Krigagem é um método de estimativa linear e local, que procura minimizar os erros de estimativas, levando em conta as características do modelo de propagação e variabilidade espacial das variáveis regionalizadas determinada pela função semivariograma (STURARO & LANDIM, 2008).

A Krigagem Ordinária considera a média como desconhecida, ou seja, flutuante ou móvel por toda a área. Estima valores em qualquer lugar, exceto nos locais onde se dispõe de observações de campo, nos quais ela reproduz o valor medido; nos pontos de observação, o erro quadrático médio desaparece (ANDRIOTTI, 2004).

3.7.5.2 Krigagem e simulação Indicativa

Segundo Landim & Sturaro (2002), no processo básico da krigagem, a estimativa é feita para um valor médio em um determinado local. Pode-se, porém, também fazer estimativas baseadas em valores que se situam abaixo ou acima de um determinado nível de corte (*cutoff*).

Para a aplicação da krigagem indicativa o passo inicial é a escolha dos níveis de corte, segundo os quais serão obtidos os mapas de probabilidades de ocorrência. O objetivo tanto pode ser a procura de valores acima do nível de corte, como na determinação de teores anômalos de um determinado bem mineral, como valores abaixo do nível de corte, como em

análise ambiental para a determinação de níveis de poluição abaixo de um certo teor. Esta decisão, portanto, é de fundamental importância, podendo tal escolha dar-se por um conhecimento “a priori”, quando já se tem informações pertinentes sobre certos valores considerados críticos em relação à variável sob estudo, ou por manipulação matemática, como no cálculo de distribuições de probabilidades acumuladas que revelarão valores de percentis.

Este procedimento, estabelecido para vários níveis de corte (quantis) de uma distribuição, conduzirá a uma estimativa de vários valores da distribuição acumulada em um determinado local, cuja função poderá ser ajustada.

Segundo a metodologia geoestatística os valores de um determinado atributo num determinado ponto do espaço x podem ser considerados como uma realização de uma variável aleatória (VA), descrita como $Z(x)$. No ponto x , portanto, $Z(x)$ pode assumir diferentes valores para o atributo considerado, com cada valor associado a uma determinada probabilidade. Desse modo, uma variável aleatória, contínua ou discreta, após ordenada pode ser caracterizada pela sua função de distribuição acumulada condicionada, isto é, uma função de distribuição acumulada condicionada aos n dados amostrados (conditional cumulative distribution function, “ccdf”).

Para se atingir estes objetivos, o primeiro passo é transformar os dados originais em indicadores, isto é, transformar os valores que estão acima de um determinado nível de corte em zero (0) e os que estão abaixo em um (1):

$$i_j(v_c) = \begin{cases} 1 & \text{se } v_j \leq v_c \\ 0 & \text{se } v_j > v_c \end{cases}$$

Desta forma, são calculados os semi-variogramas experimentais indicativos para determinados níveis de corte e estabelecem-se os modelos variográficos para os mesmos. Os semi-variogramas indicativos podem ser estimados pela função:

$$\gamma_i(h, v_c) = \frac{1}{2N_h} \sum_{i=1}^{N_h} [i(x+h, v_c) - i(x, v_c)]^2$$

Efetuando-se a krigagem ordinária pontual nos valores transformados, obtêm-se a probabilidade de $v_i < v_c$. Desta forma, à medida que se incrementa v_c , obter-se-á valores estimados da função de distribuição acumulada, assim expresso:

$$F(v; v_c / (n)) = E\{i(v; v_c) / (n)\}$$

Se não há níveis de corte com especial significado com relação à variável sob estudo, o usual é escolher 9 níveis correspondentes aos decis da distribuição. Independentemente do número de níveis distribuição acumulada da curva será sempre em função de um número finito de pontos. Para uma estimativa completa haverá necessidade de interpolações, entre os níveis considerados, e extrapolações para as além do primeiro e do último nível.

Antes de efetuar a krigagem indicativa, é necessário que para cada nível de corte seja encontrado um semi-variograma e uma boa aproximação, se possível, é procurar encontrar o mesmo modelo para todos eles, principalmente aquele correspondente à mediana.

3.7.5.3 Krigagem com o GSLIB

De acordo com Deutsch & Journel (1997), apesar de krigagem ter sido inicialmente introduzida para fornecer estimativas de valores não amostrados, ela está sendo usada cada vez mais para a construção de modelos probabilísticos de incerteza sobre esses valores desconhecidos. Estimativa de krigagem por contorno da malha é a aplicação tradicional de mapeamento de krigagem. Krigagem usado como um algoritmo de mapeamento é um filtro passa-baixo que tende a suavizar detalhes e os valores extremos do conjunto original de dados.

O princípio da krigagem é aplicado tanto como um algoritmo de mapeamento como uma ferramenta para obter distribuições de probabilidades condicionais.

CAPÍTULO 4 – CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

4.1 VIAS DE ACESSO

A área localiza-se aproximadamente 270 km da capital São Paulo. Seu acesso pode ser feito através das Rodovias SP – 310 (Rodovia Washington Luiz), SP – 215 (Rodovia Luís Augusto de Oliveira) e a SP – 255 (figura 19).

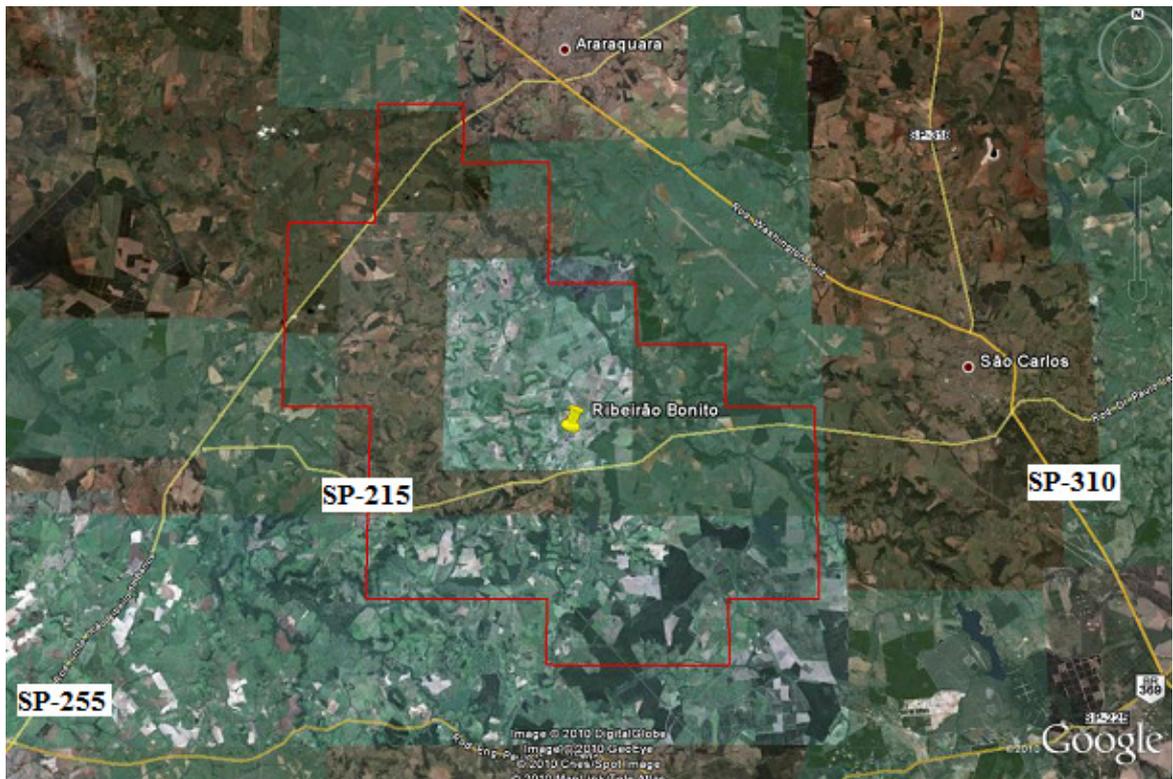


Figura 19. Figura ilustrativa do acesso à área de estudo.

Fonte: Google Earth.

4.2 GEOLOGIA

As unidades geológicas que afloram na área das bacias hidrográficas do Sistema Jacaré são os sedimentos clásticos, predominantemente arenosos, as rochas ígneas basálticas do Grupo São Bento (Mesozóico da Bacia do Paraná), as rochas sedimentares do Grupo Bauru, os sedimentos pertencentes à Formação Itaqueri e depósitos correlatos (das serras de São Carlos), de idade cretácea a cenozóica, e pelos sedimentos aluvionares associados à rede de drenagem. A sucessão em que ocorrem essas formações na área de estudo e a respectiva

caracterização das rochas estão inclusas na descrição geral da estratigrafia da Bacia do Paraná, acrescida das ocorrências de rochas mais recentes (Quaternário e Terciário) específicas da área de estudo (RABELO,2006).

A tabela a seguir representa a coluna litoestratigráfica de parte da Bacia do Paraná.

Tabela 5. Coluna litoestratigráfica de parte da Bacia do Paraná.

Fonte: IPT, 1981; IPT, 2003 *apud* RABELO, 2006.

Era	Período	Grupo	Formação	Tipo de rocha
Cenozóico	Quaternário / Terciário			Sedimentos aluvionares: aluvião em geral, incluindo depósitos de terraço. Cobertura da Serra de São Carlos e similares: arenitos conglomeráticos.
			Itaqueri	Predominantemente arenitos com cimento argiloso com lentes alongadas de folhelhos e com conglomerados líticos.
Mesozóico	Cretáceo	Bauru	Marília	Arenitos de granulação fina e grossa, compreendendo bancos maciços com tênues estratificações cruzadas de médio porte. Subordinadamente ocorrem lentes de siltitos, argilitos e arenitos muito finos. Presença comum de nódulos carbonáticos.
			Adamantina	Arenitos finos e muito finos, podendo apresentar cimentação e nódulos carbonáticos com lentes de siltitos arenosos e argilitos ocorrendo em bancos maciços, estratificação plano-paralela e cruzada de pequeno a médio porte.
			Santo Anastácio	Arenitos muito finos e médios, mal selecionados, geralmente maciços, apresentando localmente cimento e nódulos carbonáticos.
			Caiuá	Arenitos finos a médios, com grãos bem arredondados, com coloração arroxeada típica, apresentando abundantes estratificações cruzadas de grande e médio porte. Localmente, ocorrem cimento e nódulos carbonáticos.
		São Bento	Serra Geral	Rochas vulcânicas toleíticas dispostas em derrames basálticos, com coloração cinza a negra, textura afanítica, com intercalações de arenitos intertrapeanos, finos a médios, apresentando estratificação cruzada tangencial. Ocorrem esparsos níveis vitrofíricos não individualizados.
	Jurássico		Botucatu	Arenitos eólicos avermelhados de granulação fina a média, com estratificações cruzadas de médio a grande porte. Ocorrem restritamente depósitos fluviais de natureza areno-conglomeráticas e camadas localizadas de siltitos e argilitos lacustres.
	Triássico		Pirambóia	Depósitos de arenitos finos a médios, avermelhados, siltico-argilosos, com estratificação cruzada ou plano-paralela, com níveis de folhelhos e arenitos argilosos variegados e raras intercalações de natureza areno-argilosa.
Paleozóico	Permiano Superior	Passa Dois	Rio do Rasto	Depósitos de planícies costeiras compreendendo arenitos muito finos a médios, esverdeados a avermelhados e, subordinadamente, argilitos e siltitos avermelhados.
			Teresina	Depósitos possivelmente marinhos prodeltáticos, compreendendo folhelhos e argilitos cinza escuros a esverdeados ou avermelhados, finamente laminados, em alternância com siltitos e arenitos muito finos, presença de restritas lentes de calcário oolíticos e sílex.
			Serra Alta	Depósitos essencialmente marinhos incluindo siltitos, folhelhos e argilitos cinza escuros a pretos, com laminação plano-paralela.
			Irati	Siltitos, argilitos e folhelhos silticos de cor cinza clara a escura, folhelhos pirobetuminosos, localmente em alternância rítmica com calcários creme silicificados e restritos níveis conglomeráticos.
				Formação Corumbataí: depósitos possivelmente marinhos de planícies de maré, incluindo argilitos, folhelhos e siltitos cinza, arroxeados ou avermelhados, com intercalações de bandas carbonáticas, sílexitos e camadas de arenitos finos.

4.2.1 Grupo São Bento

Formação Pirambóia

A Formação Pirambóia apresenta arenitos finos esbranquiçados, amarelados, avermelhados, médios e muito finos, silto-argilosos, grãos polidos, subangulares e subarredondados, com intercalações de finas camadas de argilitos e siltitos. Há ocorrências locais de arenitos conglomeráticos com seixos de argila e, na porção basal da formação, uma camada areno-argilosa, de 1 a 2 m de espessura, com seixos angulares de sílex (SCHNEIDER et al., 1974).

Devido a características litológicas e sedimentares Schneider et al. (1974) indica origem continental fluvial, com depósitos de rios meandrantos e pequenas lagoas associadas, em condições climáticas oxidantes. Atribui-se idade Triássica a essa formação.

Formação Botucatu

A Formação Botucatu em São Paulo está exposta numa faixa contínua, às faldas das serras basálticas e em suas escarpas. Cobre área mais extensa entre os rios Piracicaba e Mogi-Guaçu.

A Formação Botucatu é caracterizada por arenitos avermelhados, finos a médios, normalmente bimodais, friáveis, grãos foscos e geralmente bem arredondados. Podem ocorrer localmente arenitos argilosos mal selecionados, concentrados mais na parte basal. A deposição ocorreu em ambiente desértico, com deposição eólica, podendo ter na parte basal contribuição de sedimentação fluvial (SCHNEIDER et al., 1974). As relações estratigráficas indicam idade Jurássico-Cretácea.

Formação Serra Geral

Schneider et al. 1974, descreve a Formação Serra Geral como o resultado de vulcanismo fissural, que iniciou-se quando ainda penduravam as condições desérticas de sedimentação da Formação Botucatu. Consiste basicamente em lavas basálticas, toleíticas, de textura afanítica, coloração cinza a negra, amigdaloidal no topo dos derrames e com grande desenvolvimento de juntas verticais e horizontais. Pode ocorrer em sua parte inferior intercalações de arenitos finos a médios, possuindo estratificação cruzada tangencial.

Meaulo (2004) afirma que essa Formação é composta em grande parte de basaltos e os derrames basálticos recobrem mais de um milhão de km². Basicamente a formação Serra Geral é composta por lavas basálticas, de textura afanítica e de coloração cinza a negra na porção superior (SCHNEIDER et al., 1974). Na porção inferior podem ocorrer intercalações entre os derrames basálticos e os arenitos eólicos (MEAULO, 2004).

As intercalações entre os derrames basálticos da Formação Serra Geral e os arenitos eólicos da Formação Botucatu são denominadas de feições intertrapianas. Schneider (1974) considera que os Derrames Basálticos começaram durante as condições desérticas de deposição da Formação Botucatu.

4.2.2 Grupo Bauru

Formação Adamantina

A Formação Adamantina pertence ao Grupo Bauru e está sobreposta a Formação Serra Geral. Ocorre em grande extensão do Estado de São Paulo e constitui a maior parte do Planalto Ocidental (SCHNEIDER et al., 1974).

Apresenta bancos arenosos de granulação fina a muito fina, cor rósea a castanho e seixos de argilito, cimento e nódulos carbonáticos (SOARES et al., 1980). De acordo com Paula e Silva, Chang e Caetano-Chang (2003) e Fernandes e Coimbra (1996) apud Rabelo (2006), a Formação Adamantina apresenta deposição fluvial em canais meandantes e extensa planície aluvial.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 SUPERFÍCIE TOPOGRÁFICA

A partir de modelos digitais de elevação do SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), uma imagem de satélite da área de estudo no formato SRTM (figura 20) foi transformada em uma malha quadrada com 250 mil pontos e com o espaçamento de 100 metros entre cada ponto. Tendo em vista que o arquivo com o total dos dados foi obtido de uma imagem demasiadamente densa de pontos, foi feita uma reamostragem aleatória de tal forma que fosse mantido um espaçamento adequado dos nós da malha com as cotas topográficas.

As coordenadas da área de estudo são: $X_{\text{mín}}= 773502.11$; $X_{\text{máx}}= 809502.11$; $Y_{\text{mín}}= 7541281.243$ e $Y_{\text{máx}}= 7582981.243$.

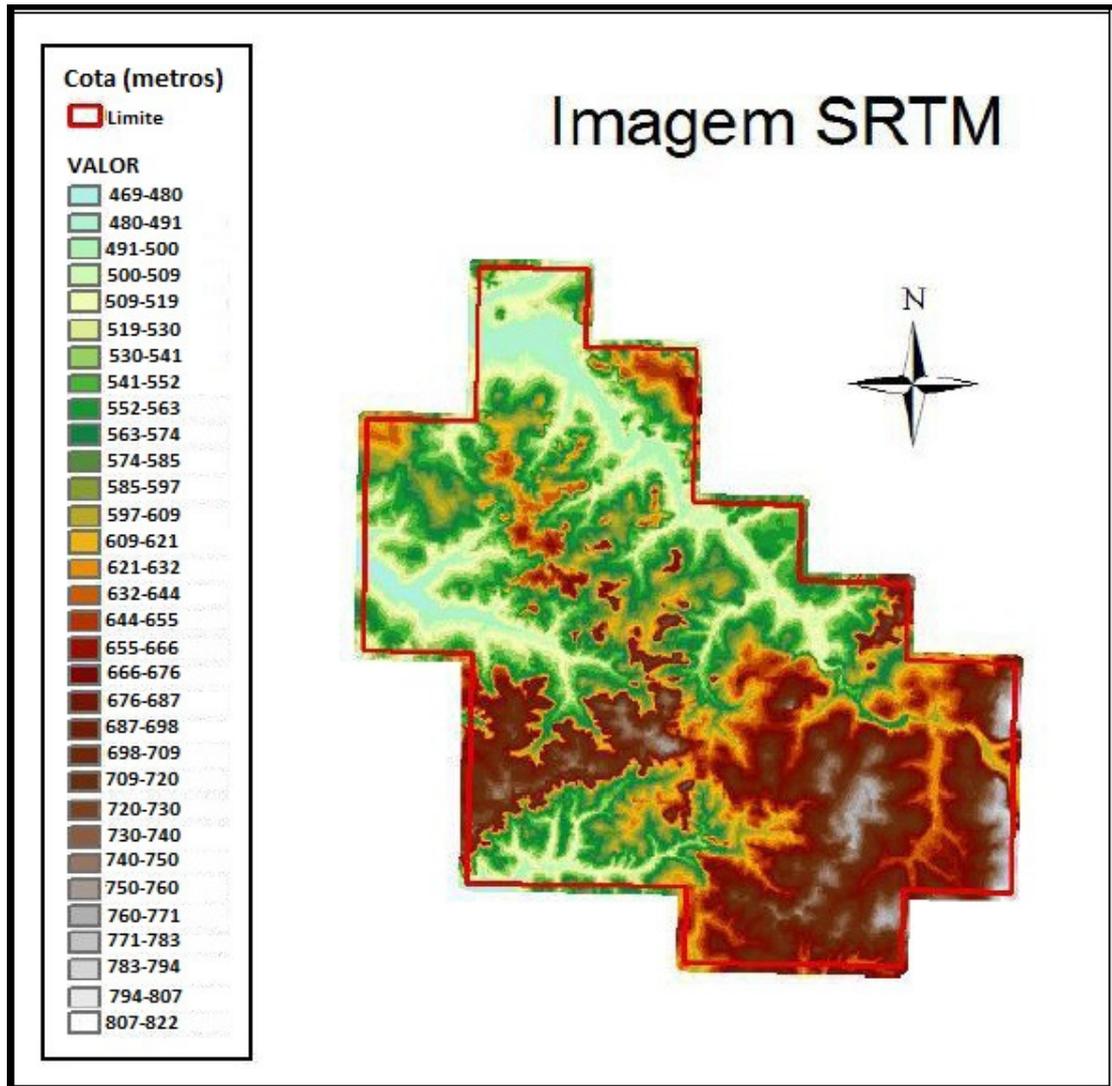


Figura 20. Imagem SRTM da área de estudo.

Os valores da cota topográfica para as amostras variaram de 469 metros até 822 metros de altitude. Os valores da média e da mediana encontram-se próximos, fato este que sugere uma distribuição normal.

A análise do histograma dos dados topográficos (figura 21) demonstra valores médios de 629,6 m de altitude, e apresenta um coeficiente de variação de 13%, ou seja, uma baixa dispersão.

Nota-se uma configuração binormal do histograma que reflete o arcabouço litológico e topográfico da área, ou seja, as cotas das Formações Botucatu e Pirambóia são comumente mais baixas que as cotas da Formação Serra Geral.

O variograma modelado da cota topográfica (figura 22) apresentou-se bem estruturado de acordo com o modelo esférico. Assim, o modelo ajustado apresenta os seguintes

parâmetros: uma componente aleatória de 143,52 m (Efeito Pepita – C0), 16800m de Range e 6417 m² de Sill (C1).

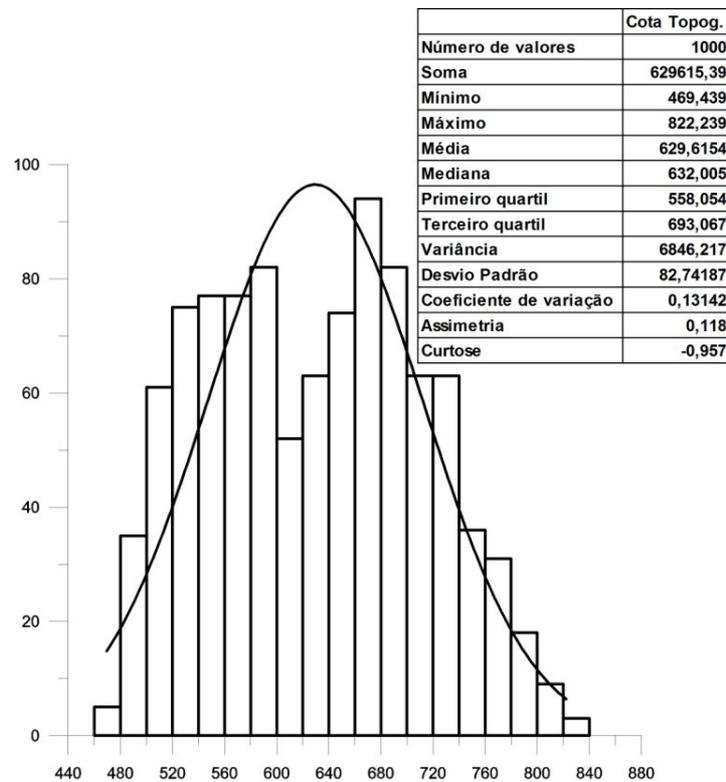


Figura 21. Histograma de frequência da variável cota topográfica.

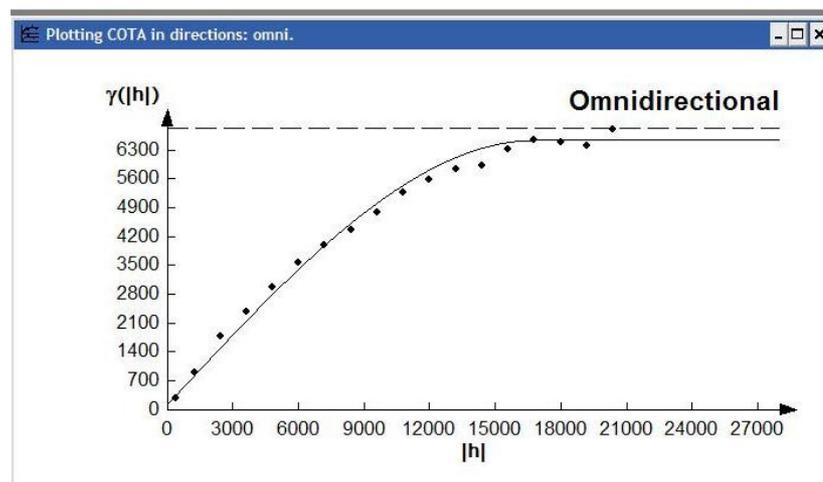


Figura 22. Variograma modelado da cota topográfica.

Após a modelagem do variograma e a obtenção dos parâmetros básicos do modelo esférico como o Efeito Pepita, o Range e o Sill, foi elaborado um mapa da superfície topográfica através do método da krigagem ordinária (figura 23). Esse mapa foi gerado com

grid de 50m x 50m, que resultou em 2500 pontos interpolados e apresentou características semelhantes à imagem de satélite utilizada. Os locais com as menores cotas estão relacionados às drenagens. As rochas das formações Pirambóia e Botucatu estão localizadas nas menores cotas, e as rochas da formação Serra Geral estão sobrepostas a essas formações e com uma paisagem mais arrasada, pode-se encontrar no baixo relevo morrotes pertencentes à formação Serra Geral.

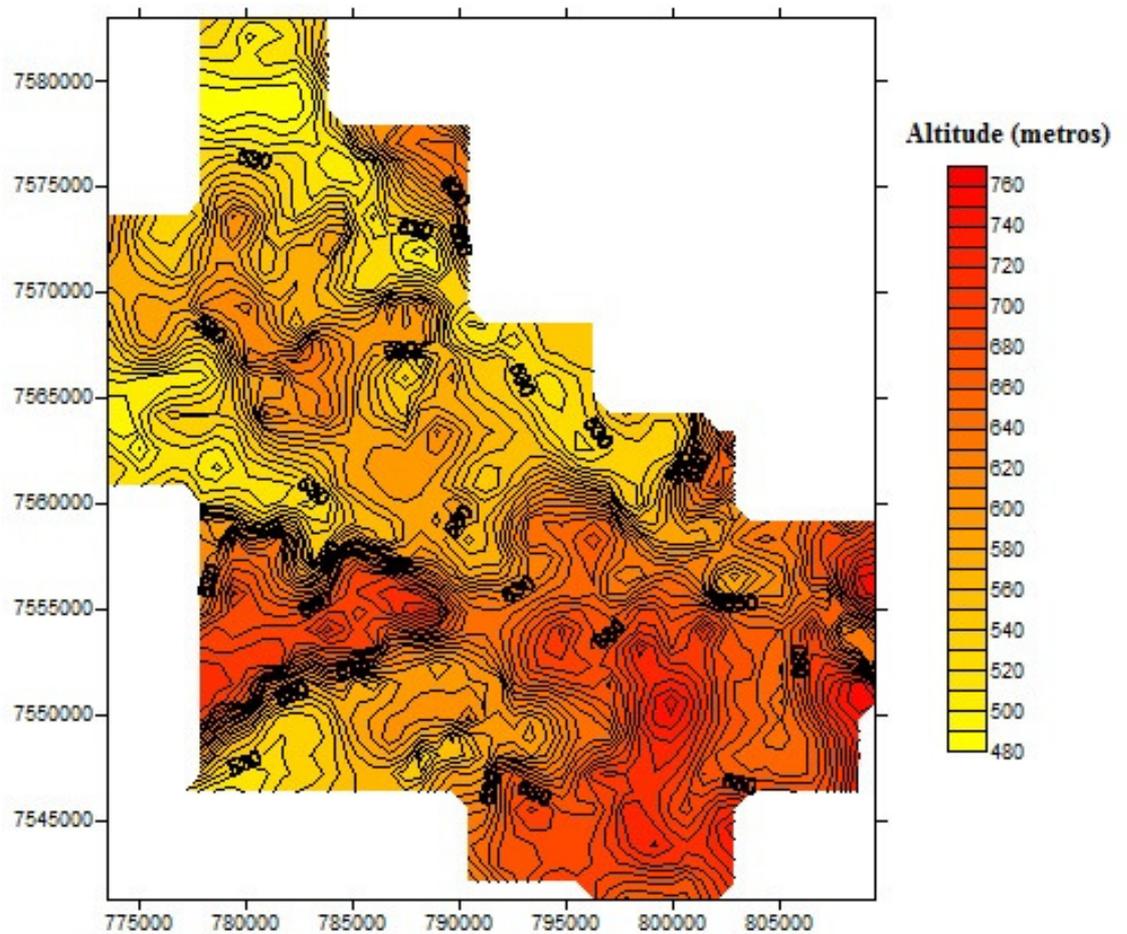


Figura 23. Superfície da Cota Topográfica.

5.2 SUPERFÍCIE DO NÍVEL ESTÁTICO

A figura 24 ilustra os pontos amostrados na região, assim como a distribuição dos ensaios de permeabilidade que foram realizados.

Para a caracterização da altitude do nível estático (lençol freático) foram utilizados conceitos de hidrologia e hidrogeologia. Com a utilização de cartas topográficas da área estudada na escala de 1:10.000 foi elaborada uma tabela com as coordenadas x,y e as cotas do nível d'água obtidos das drenagens principais e no máximo da secundária. Para complementar os dados extraídos das cartas topográficas, nas etapas de campo foram realizadas leituras da profundidade do nível d'água com um medidor de nível d'água obtidas em situ (“poços caipira” já existentes no local).

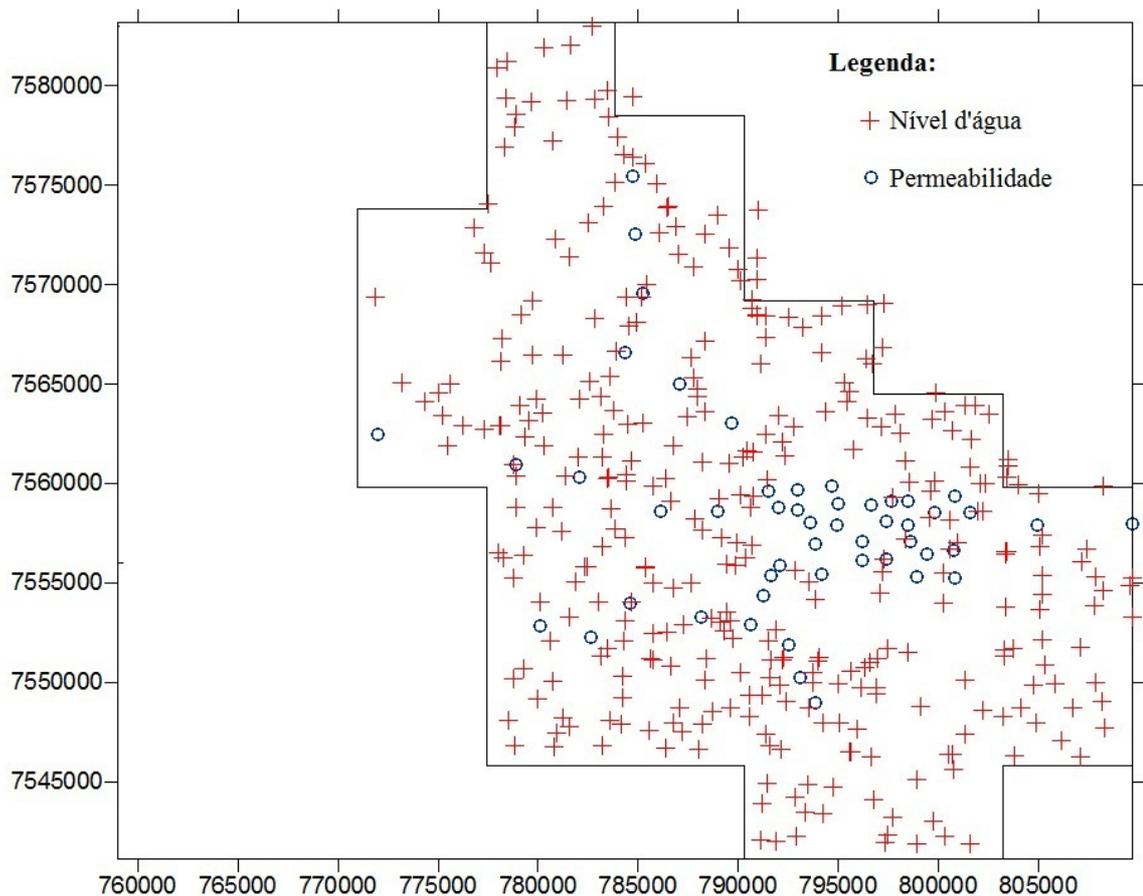


Figura 24. Distribuição espacial de pontos amostrados, inseridos no mosaico de 32 folhas que compõem a área de estudo.

Para o nível estático foram obtidos 371 pontos que se situaram entre 464 metros e 712 metros de altitude. A média dos pontos foi de 561,8 metros, valor pouco acima do valor da mediana.

O histograma de distribuição de frequência das cotas do nível estático, ilustrado pela figura 25, apresenta ligeira assimetria com valor de 0,528 com valor médio de 561,8 metros de altitude. A classe modal, com valores de cota entre 500 e 520 metros, representam o background da região. Seu coeficiente de variação é relativamente baixo (10%), o que é esperado dessa variável.

O variograma do nível estático do tipo esférico (figura 26) apresentou Efeito Pepita de 156m, Range de 13999m e Sill de 3315m².

Após a modelagem do variograma foi elaborada uma superfície dessa variável através da krigagem ordinária, representada na figura 27. Esse mapa foi gerado com grid de 50m x 50m, com o intuito de se obter uma malha idêntica à usada para a confecção da superfície topográfica. Esta superfície do nível estático expressa sua representatividade com o encaixe das principais drenagens e podem ser observadas no sentido SE-NW da área de estudo.

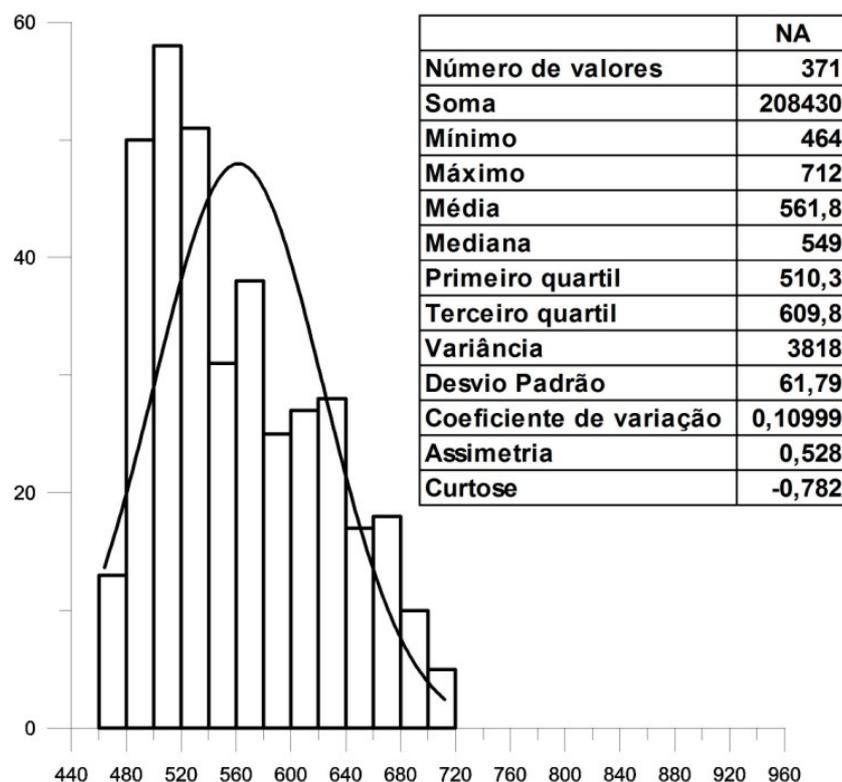


Figura 25. Histograma de frequência da variável Nível Estático.

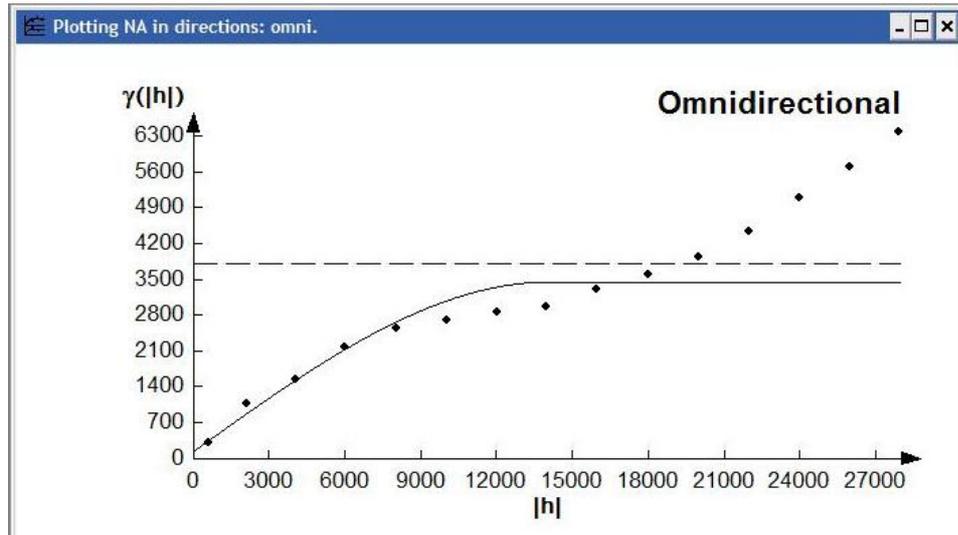


Figura 26. Variograma modelado para o Nível Estático.

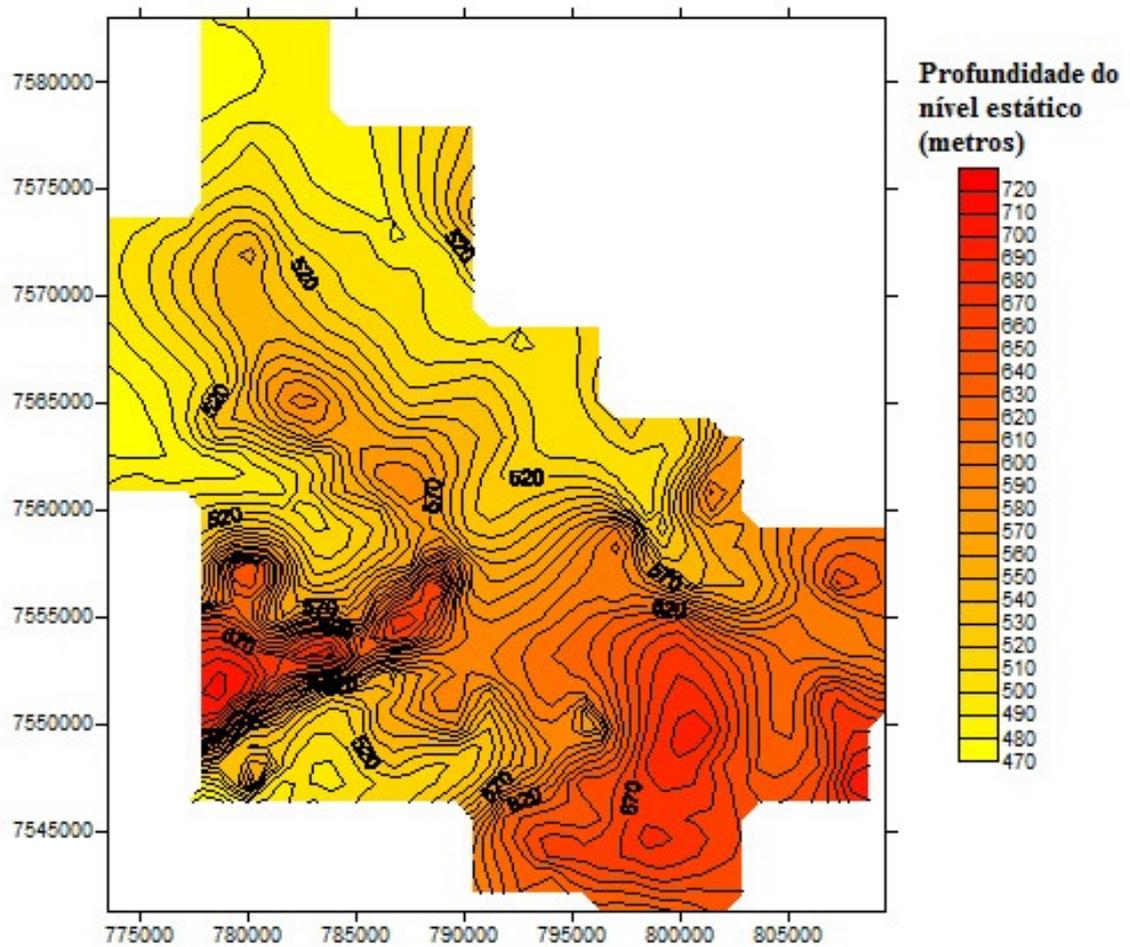


Figura 27. Superfície do Nível Estático.

5.3 DETERMINAÇÃO DA ZONA INSATURADA

Após a confecção das superfícies da cota topográfica e da cota do nível estático, foi realizada através da função Math no ícone Grid do Surfer 10 uma subtração entre as duas malhas, cujo resultado foi uma malha densa de 50m x 50m.

A presença de valores negativos encontra-se ao longo dos rios. Esta evidência possibilita que esses valores de espessura sejam alterados para zero, tendo em vista o controle consistente das cotas de nível d'água junto às drenagens.

A espessura média da zona insaturada variou de 0 metros a 140 metros, sendo que os locais com menor espessura encontram-se relacionados com aqueles onde se localizam as principais drenagens.

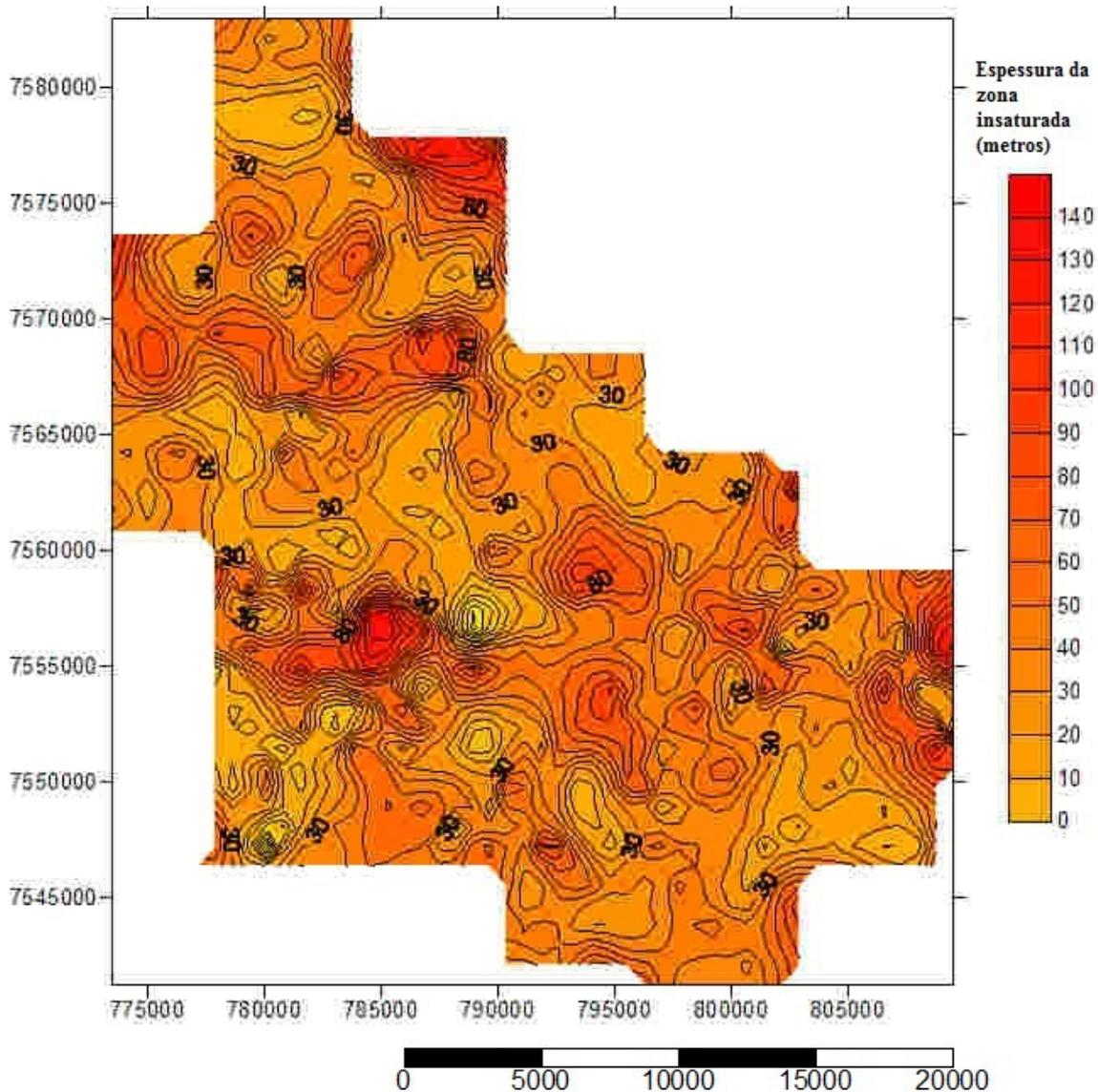


Figura 28. Superfície da zona insaturada média obtido pela diferença entre as malhas da topografia e cota do nível estático.

Tendo em vista que o Índice AVI, alvo deste trabalho, apresenta-se em classes de vulnerabilidade, optou-se pela geoestatística não paramétrica, ou seja, calculando-se os valores médios, tanto para a espessura da zona insaturada como para a permeabilidade, por um método único para as duas variáveis.

Utilizou-se como níveis de corte para a aplicação da krigagem indicativa da superfície da zona insaturada o 1º quartil (25,55 metros), a mediana (39,74 metros), a média (43,09 metros) e o 3º quartil (57,09 metros). Os resultados são apresentados a seguir.

A modelagem do variograma foi realizada através do modelo exponencial para a variável, obtendo-se assim, os valores de Nugget (efeito pepita)= 0,098m, Range= 20880m e Sill= 0,168m².

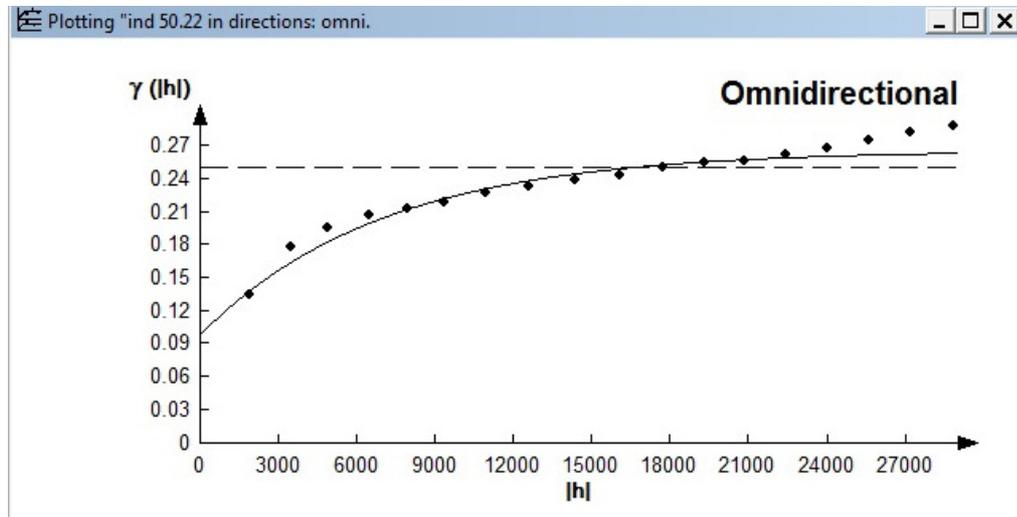


Figura 29. Variograma da espessura da camada da zona insaturada.

Concluída a análise da variabilidade, a etapa seguinte foi confeccionar o mapa dos valores esperados (valores médios) por meio da krigagem indicativa da mediana.

Com a obtenção dos valores médios pelo software GSLIB, foi possível gerar o mapa vetorial por meio do Surfer 10. Utilizou-se para isto o programa GSSURFER (Interfaces úteis entre programas geoestatísticos comumente utilizados. In VIII Simpósio de Quantificação em Geociências-Rio Claro UNESP- 2000,V.1,p. 207 – 208) que realizou a mudança de formato dos dados. Em seguida, foi elaborado o mapa dos valores esperados da espessura zona insaturada utilizando-se os resultados do GSSURFER.

Os valores esperados para a espessura da zona insaturada observados no mapa variam entre 17,2 metros e 19,9 metros.

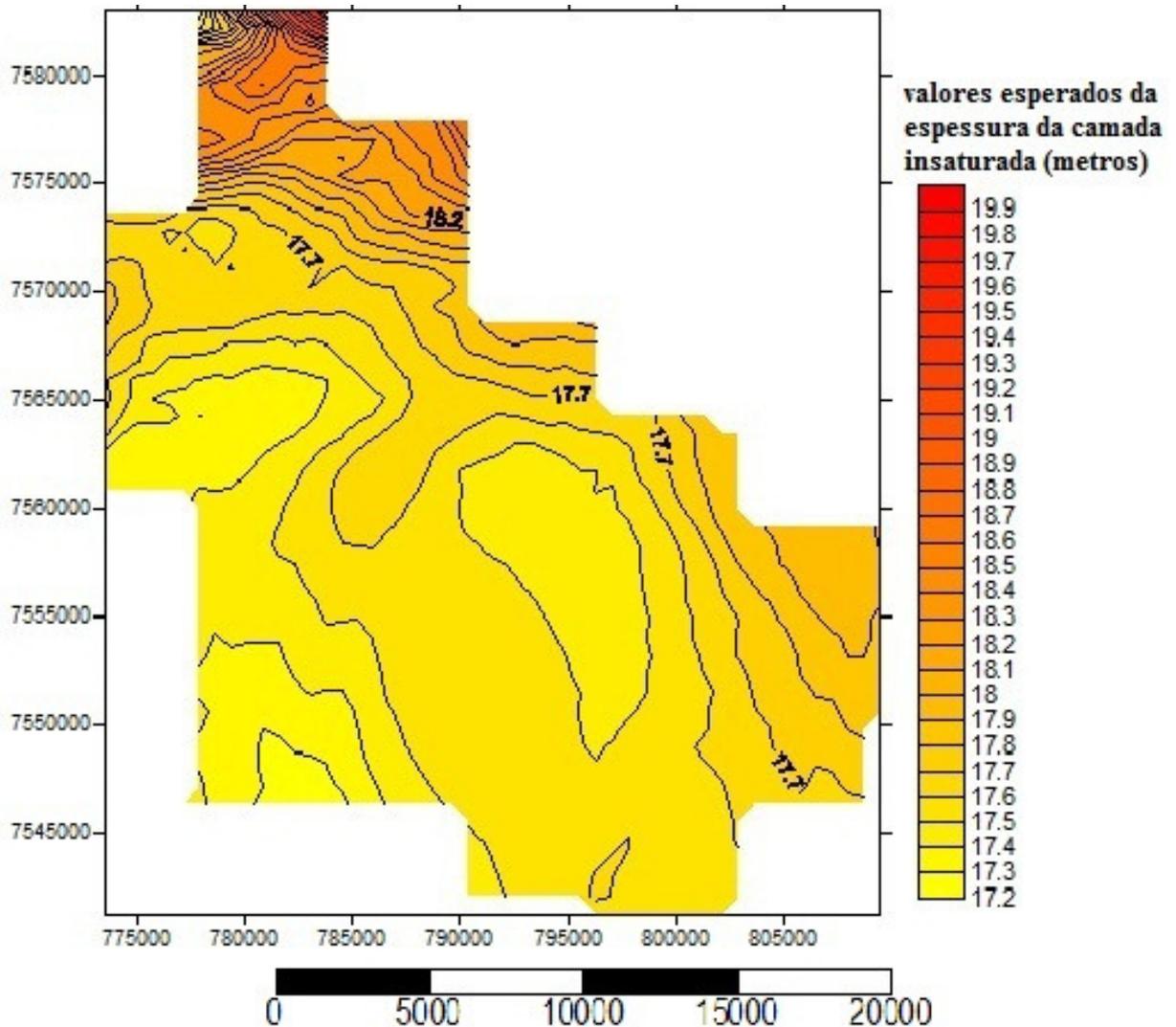


Figura 30. Mapa dos valores esperados (e-type) da camada insaturada.

5.4 DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA (K)

Foram realizados no projeto 50 ensaios de campo, como descritos no item 3.3.2, em locais escolhidos semi-regulares utilizando o Permeâmetro de Guelph. A distribuição espacial dos ensaios de permeabilidade nos locais amostrados dentro da área de estudo pode ser observada na figura 31, existem três pontos ensaiados que estão fora do limite da área de estudo.

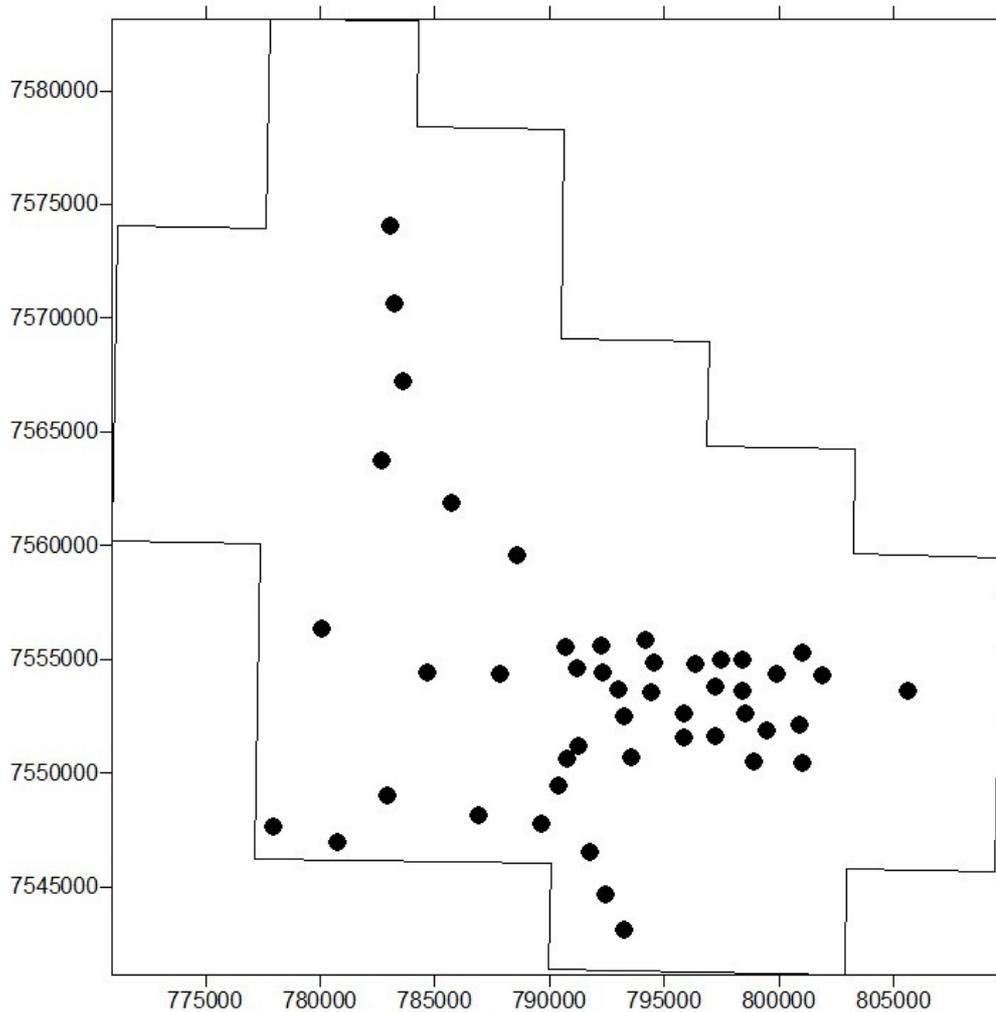


Figura 31. Distribuição espacial dos ensaios de permeabilidade.

A partir desses ensaios, é possível determinar a curva de infiltração de água no solo, que representa o comportamento da taxa de infiltração em função do tempo. A curva de infiltração geralmente apresenta um comportamento decrescente, atingindo um comportamento assintótico e constante ao longo do tempo, o que indica que o fluxo de entrada da água no solo alcançou um regime estável e constante. Nessa condição, todo o perfil encontra-se saturado, o que permite determinar a condutividade hidráulica efetiva do solo em campo (MOREIRA et al., 2002).

A aplicação das equações (ver item 3.3.2) com o uso dos parâmetros obtidos em campo definiu os valores da condutividade hidráulica pelo Permeâmetro de Guelph (K).

Os valores de condutividade hidráulica situaram-se entre 0,12 metros/dia e 13,8 metros/dia (figura 34). A média dos valores é igual a 2,91 m/dia. No entanto, com vista na forte assimetria da distribuição, o valor da mediana torna-se mais representativo, ou seja, 1,75

m/dia. A distribuição de frequência da variável Condutividade Hidráulica encontra-se no histograma (figura 32).

O variograma (figura 33) foi modelado com o modelo esférico para a variável indicativa da permeabilidade e apresentou 0,07m de Efeito Pepita, 2200 m de Range e $0,24\text{m}^2$ de Sill. Com a obtenção desses parâmetros e utilizando o software IK3D da biblioteca GSLIB, foram calculadas as distribuições de probabilidades acumuladas para cada nó da malha (grid) a ser interpolada. Assim, pode-se estabelecer o cálculo do valor médio e da probabilidade de qualquer valor dentro dos limites do AVI situarem-se acima ou abaixo de um determinado valor de corte.

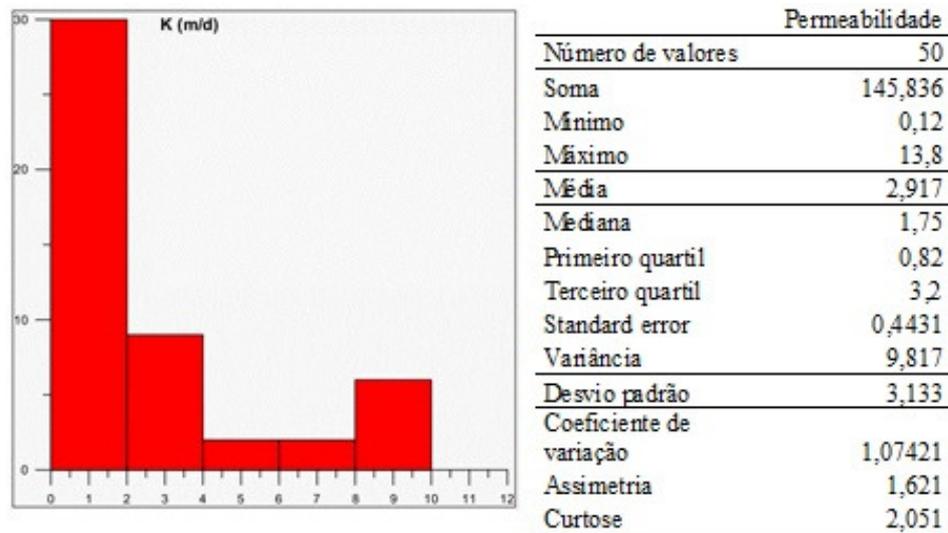


Figura 32. Histograma de frequência da variável de condutividade hidráulica.

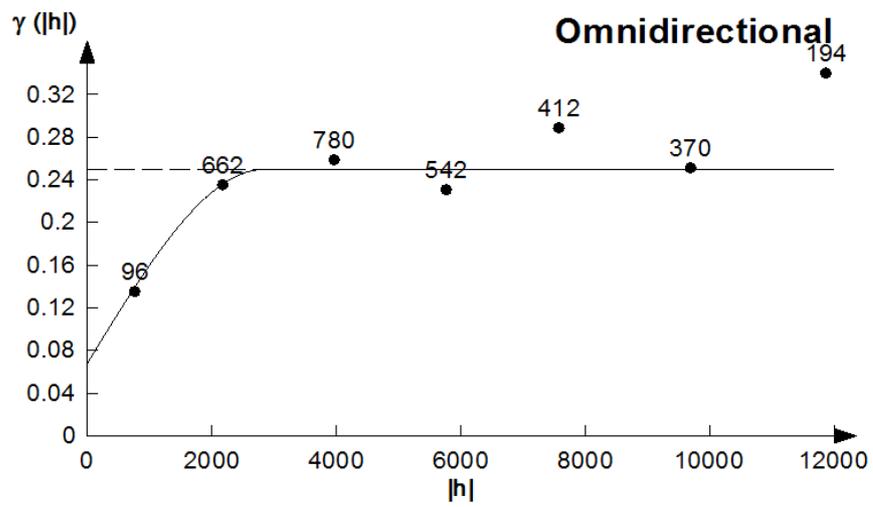


Figura 33. Variograma modelado para a condutividade hidráulica.

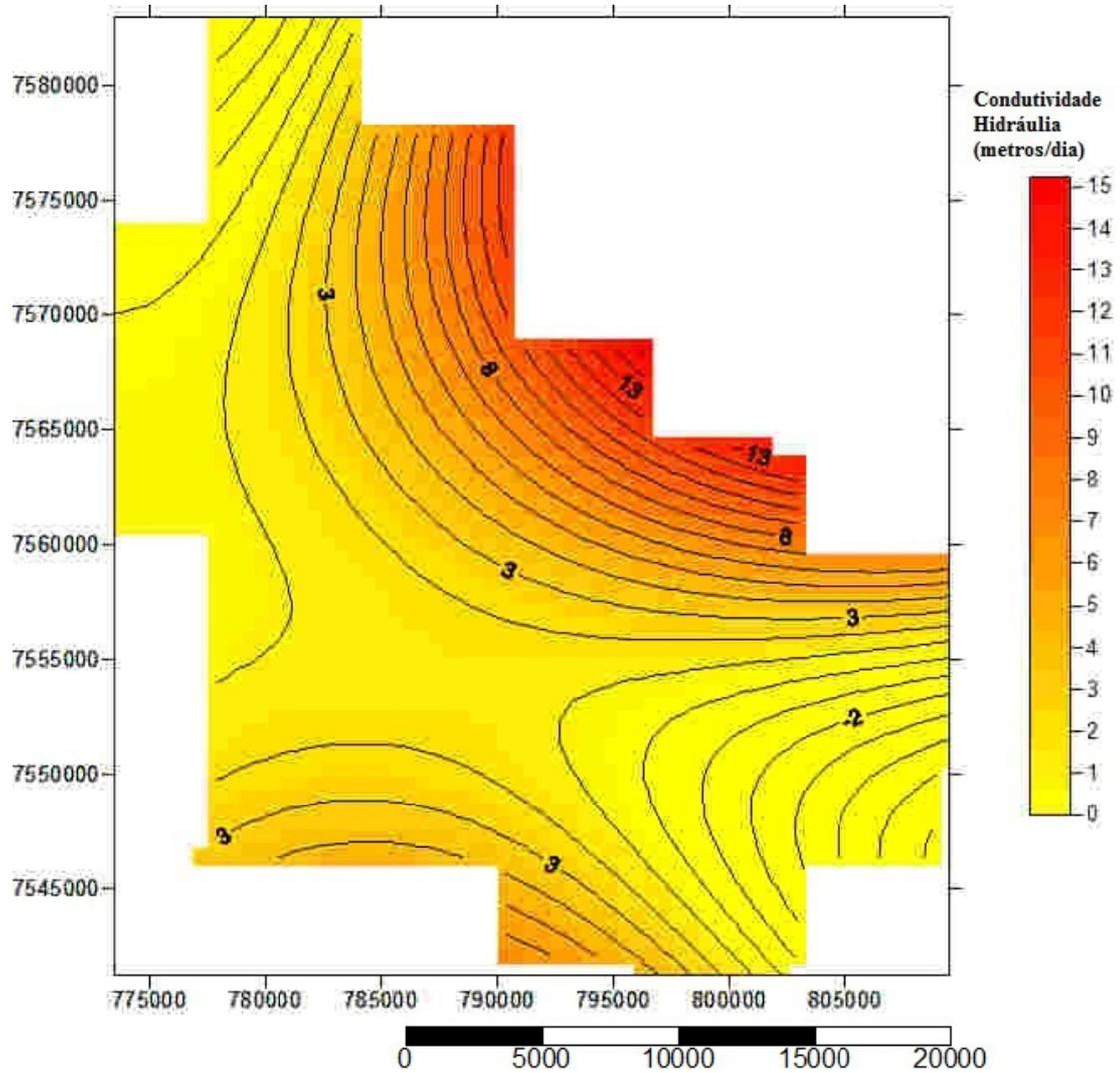


Figura 34. Mapa da condutividade hidráulica (k), em metro/dia.

5.5 MAPA DO ÍNDICE AVI

Para a obtenção do Índice AVI é necessário calcular a razão entre a espessura da zona insaturada pela condutividade hidráulica, ou seja:

$$AVI = \text{espessura(m)} / K \text{ (m/d)}$$

A resposta é dada em tempo (no caso em dias e posteriormente transformada em anos) e a razão foi calculada através de uma operação matemática entre as malhas (espessura da zona insaturada e permeabilidade) realizada através da função Math no ícone Grid do software Surfer 10.

Assim, calculou-se o valor médio esperado do Índice AVI, bem como a probabilidade do mesmo situar-se em intervalos de 0 a 10 anos, de 10 a 20 anos, de 20 a 30 anos e acima de 30 anos.

Após a realização da krigagem indicativa foi possível, através dos Softwares GSLIB 2.0 e Surfer 10, confeccionar o mapa dos valores médios do índice AVI (*e-type*) que está representado pela figura 35. Utilizou-se como níveis de corte para a aplicação da krigagem indicativa do índice AVI os seguintes valores: o 1º quartil (6,81 anos), um valor intermediário (10 anos), a mediana (14,34 anos), um valor intermediário (20 anos) e o 3º quartil (31,94 anos).

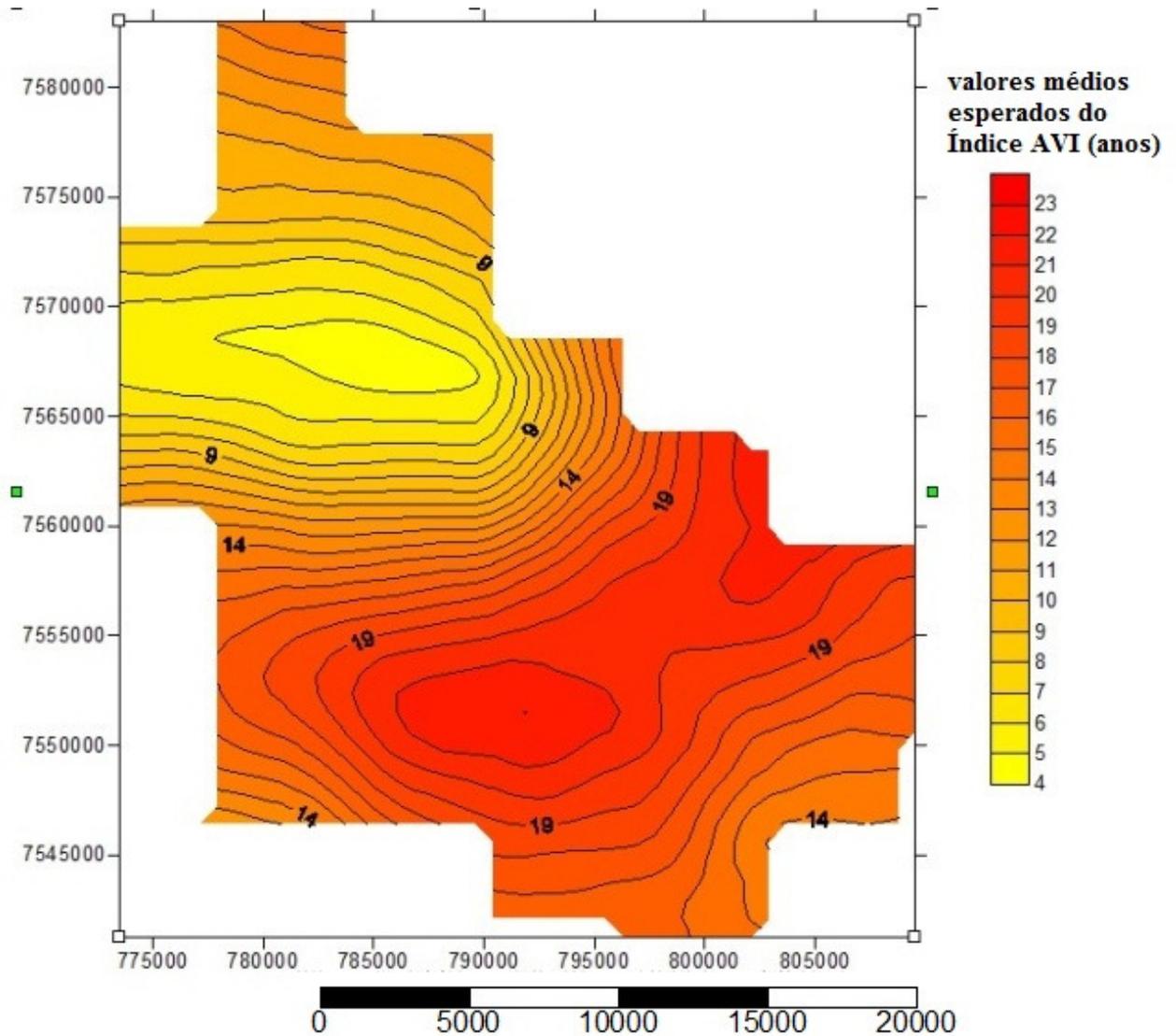


Figura 35. Mapa dos valores médios esperados (*e-type*) do Índice AVI.

Este mapa possui valores médios que variam entre 4 e 23 anos.

Foi também gerado através da krigagem indicativa os mapas de probabilidades condicionais. Como os valores médios do Índice AVI variam entre 4 e 30, foram gerados os mapas da probabilidade do Índice AVI estar entre 0 a 10 anos, entre 10 a 20 anos, entre 20 a 30 anos, e a probabilidade do Índice AVI ser maior que 30 anos. O índice de probabilidade varia de 0 a 1.

A probabilidade de o Índice AVI estar entre 0 a 10 anos está representada pelo mapa da figura 36.

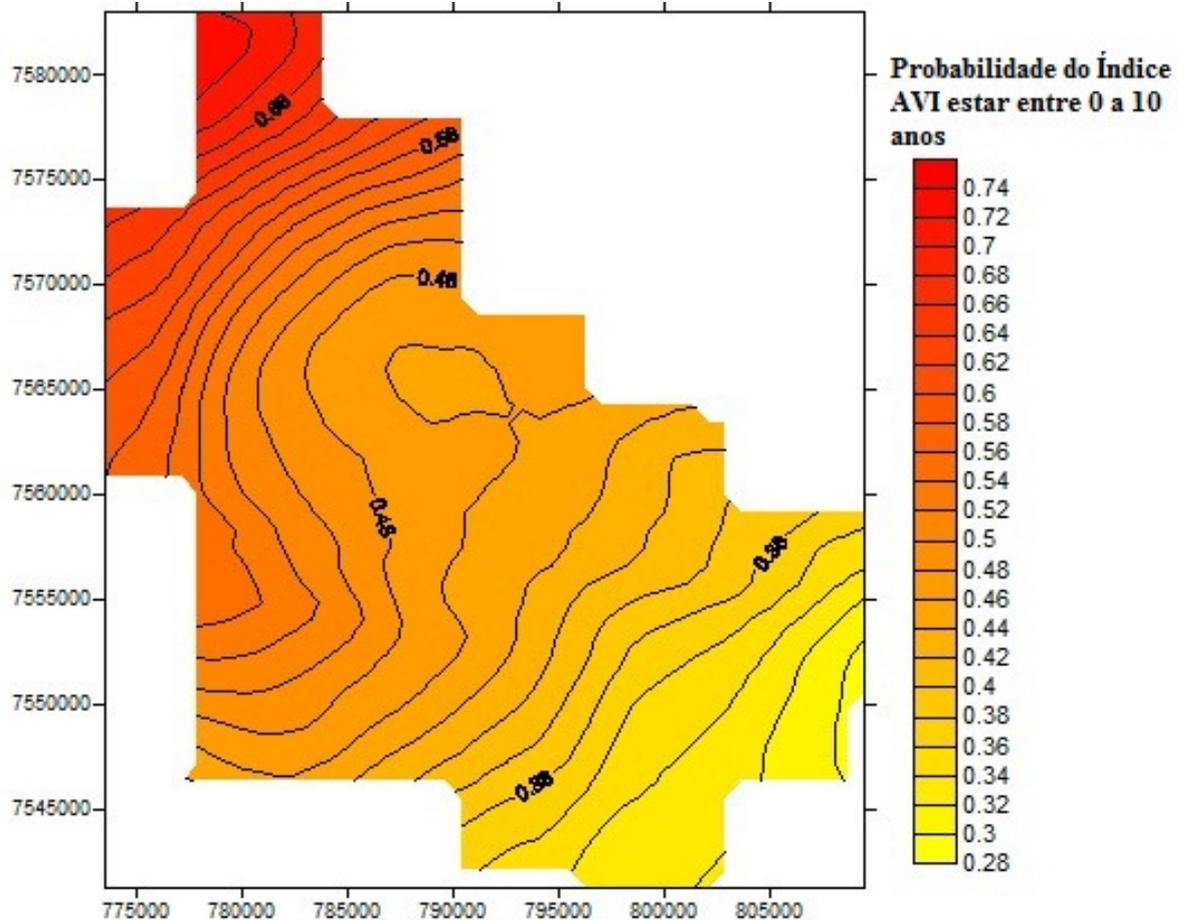


Figura 36. Mapa da probabilidade do Índice AVI estar entre 0 a 10 anos.

Através da figura 36, é possível observar que os valores de probabilidade são altos, variando entre 0.28 e 0.74. Isso se deve ao fato de que grande parte da área de estudo está enquadrada no Índice AVI extremamente alto de vulnerabilidade (entre 0 a 10 anos). Também é possível inferir que a porção norte da área é a que possui as maiores probabilidades, portanto, é a porção com vulnerabilidades mais altas.

A figura 37 representa a probabilidade de o Índice AVI estar entre 10 a 20 anos.

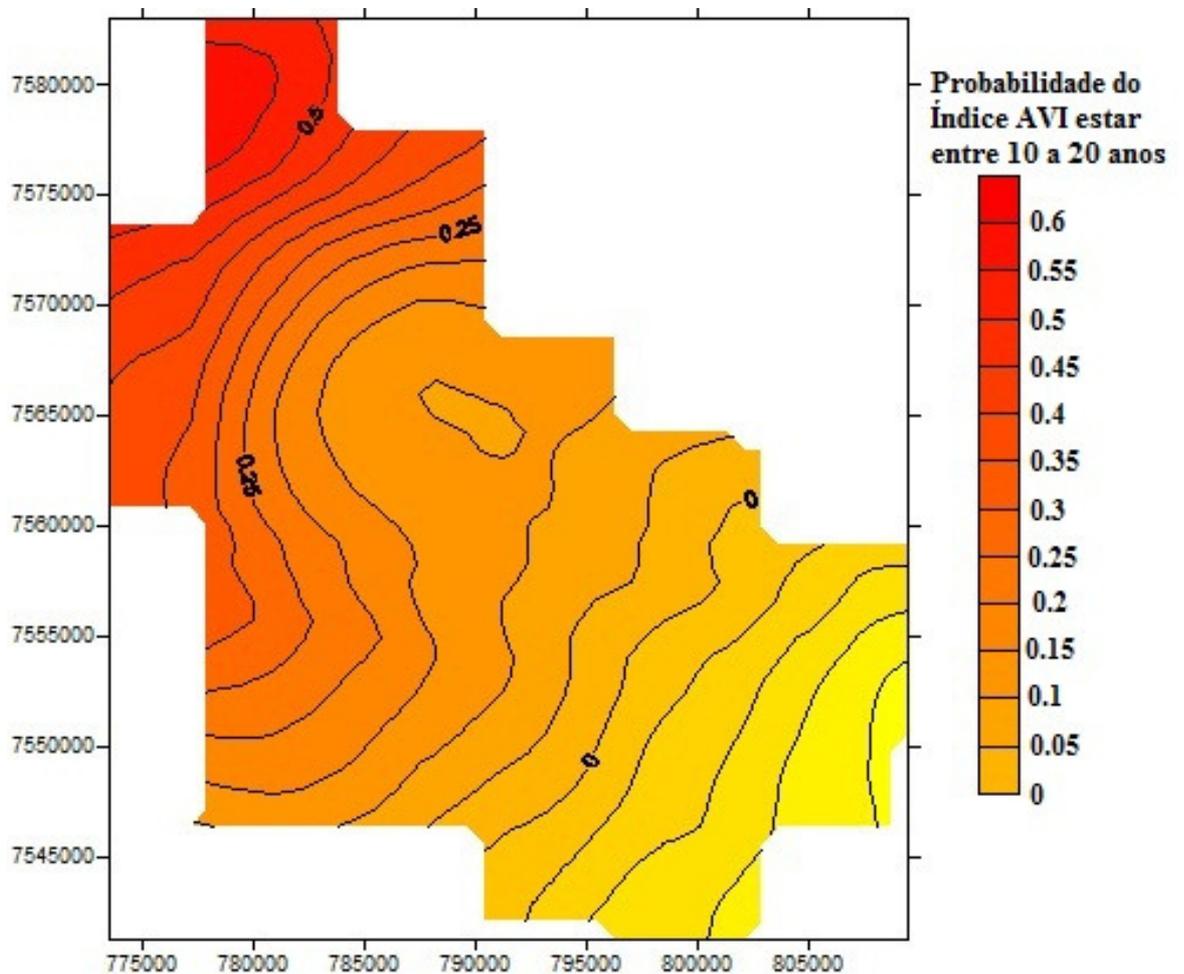


Figura 37. Mapa da probabilidade do Índice AVI estar entre 10 a 20 anos.

Através da figura 37, é possível observar que os valores de probabilidade não são mais tão altos comparados com os valores da probabilidade do Índice estar entre 0 a 10 anos, variando de 0 a 0.6. Isso deve-se ao fato de que a maior parte da área de estudo está enquadrada no Índice AVI extremamente alto de vulnerabilidade (entre 0 a 10 anos). Também é possível observar que a porção norte da área ainda é a que possui as maiores probabilidades, portanto, é a porção com vulnerabilidades mais altas.

O mapa da figura 38 representa a probabilidade do Índice AVI estar entre 20 a 30 anos.

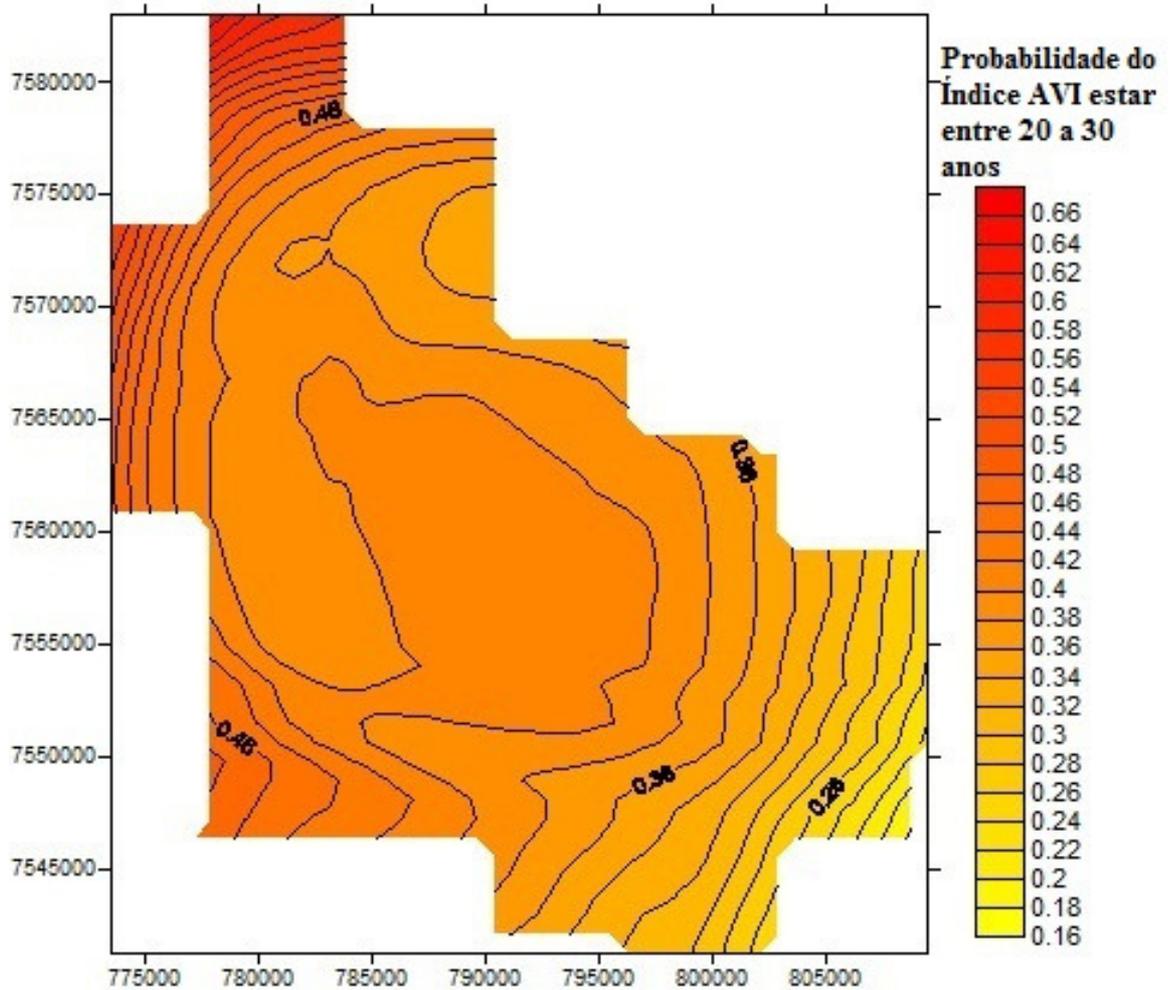


Figura 38. Mapa da probabilidade do Índice AVI estar entre 20 a 30 anos.

É possível observar através da figura 38 que os valores de probabilidade são muito parecidos com os da probabilidade do Índice estar entre 10 a 20 anos, variando de 0.16 a 0.66. Também é possível observar que a porção norte da área continua sendo a que possui as maiores probabilidades, pois é a porção com vulnerabilidades mais altas.

O último mapa (figura 39) representa a probabilidade de o Índice AVI ser maior do que 30 anos.

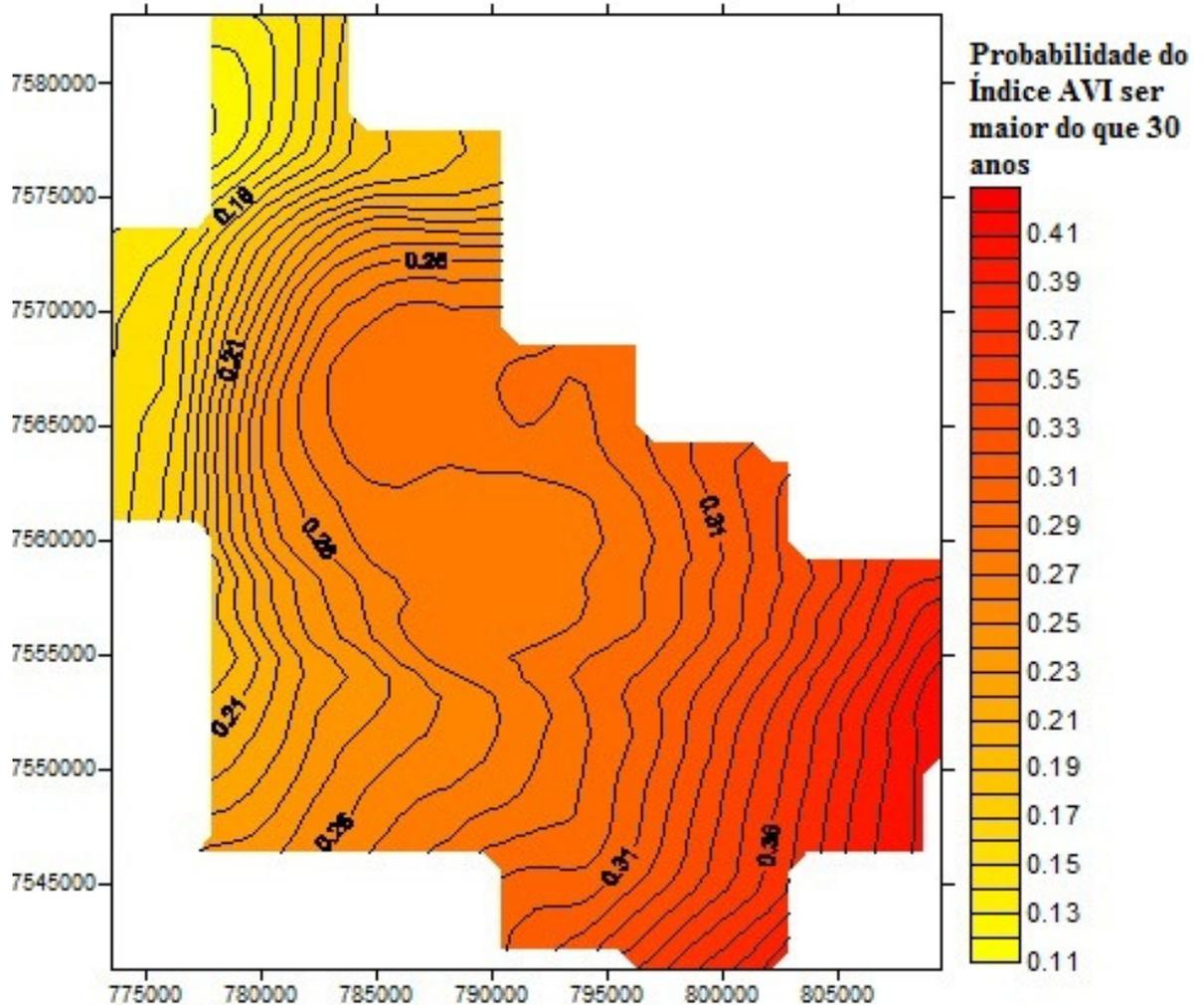


Figura 39. Mapa da probabilidade do Índice AVI ser maior do que 30 anos.

É possível observar através da figura 39 que os valores de probabilidade são baixos, variando de 0.11 a 0.41. Isso se deve ao fato de que grande parte da área está enquadrada na classe extremamente alta do Índice AVI, portanto possui valores menores do que 30 anos.

CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES

Os dados interpretados através do histograma da topografia e da variável do nível d'água apresentaram uma distribuição simétrica próxima da normal. Com relação ao da permeabilidade, notou-se a presença de *outliers* que determina a variografia tornando mais complexa a sua continuidade espacial.

Com relação aos variogramas, o modelo do tipo esférico e omnidirecional foi ajustado para as três variáveis (cota topográfica, nível d'água e permeabilidade), sendo que o variograma da cota topográfica e do nível d'água apresentaram um bom ajuste cujos parâmetros demonstram significativa continuidade espacial. O modelo do tipo esférico também foi aplicado para a espessura da camada da zona insaturada cuja componente aleatória foi significativa, porém, o gráfico apresentou um longo alcance do Range. Fato este, que possibilita capturar um maior número de dados para sua estimativa.

Com relação ao variograma da permeabilidade foi empregada uma modelagem não-paramétrica, tendo em vista sua alta variabilidade no espaço. Isto se deve às características intrínsecas da variável que tem uma malha de distribuição da amostragem muito irregular na área.

A técnica de avaliação da vulnerabilidade pelo Índice AVI, utilizando-se dos métodos geoestatísticos, embora trabalhosa constitui-se em um dos métodos mais robustos e consistentes de estimativa. Os resultados das variáveis apresentados nos mapas devem ser considerados como valores médios do índice de vulnerabilidade, visto que a krigagem ordinária possui um efeito suavizante das suas estimativas.

O mapa gerado através do método da krigagem indicativa (figura 35) apresentou valores conservadores como resultado, pois os valores médios variam de 4 a 23 anos, ou seja, a classificação de toda a área apresentou valores de AVI predominantemente classificados nos intervalos como alta (10-100 anos) e extremamente altos (0-10 anos).

Os mapas de probabilidades também indicam que a maior parte da área se enquadra como vulnerabilidade extremamente alta, visto que os maiores valores de probabilidade são os de o índice AVI estar entre 0 e 10 anos (figura 36).

Estes valores de vulnerabilidade altos condizem com a realidade da área de estudo e ocorrem devido aos solos porosos e pouco coesos, decorrentes das formações Botucatu e Pirambóia.

Este trabalho demonstra a viabilidade do emprego de técnicas geoestatísticas para avaliar a vulnerabilidade das águas subterrâneas.

CAPÍTULO 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRIOTTI, JOSÉ LEONARDO SILVA. **Fundamentos de Estatística e Geoestatística**. Editora Unisinos. São Leopoldo- RS.2004.

ARAÚJO, L. M.; FRANÇA, A, B,; POTTER, P, E. **Aquífero Gigante do Mercosul no Brasil, Argentina, Paraguai e Uruguai: mapas hidrogeológicos das formações Botucatu, Pirambóia, Rosário do Sul, Buena Vista, Misiones e Tacuarembó**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, Biblioteca de Ciência e Tecnologia e Petrobrás, 1995.16p.

BRANDT, Matheus Augusto C. **Mapeamento da Condutividade Hidráulica da cobertura do Aquífero Guarani, situado na Bacia Hidrográfica dos rios Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira, na porção centro-norte do Estado de São Paulo**. Trabalho de Conclusão de Curso. Rio Claro, 2010.

BRIGGS IC. 1974. **Machine contouring using minimum curvature**. Geophysics, 39(1): 39-48.

Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB). Disponível em <http://www.cetesb.sp.gov.br>. Acessado em 20 de fevereiro de 2013.

Comitê PCJ. Disponível em <http://www.comitepcj.sp.gov.br/>. Acessado em 15 de março de 2013.

CORRÊA, U. M. P. **Estudo das águas subterrâneas das bacias hidrográficas dos rios Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira no Estado de São Paulo**. 1995. 107f. Dissertação

(Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.

Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE). Disponível em <<http://www.dae.sp.gov.br/>>. Acesso em 05 de julho de 2013.

Departamento de Estradas de Rodagem (DER). Disponível em <<http://www.der.sp.gov.br/>>. Acesso em 02 de junho de 2013.

DEUTSCH, C. V.; JOURNEL, A. G. **GSLIB: Geostatistical software library and user's guide**. 2 ed. New York: Oxford University Press, 1997. 384p. (Applied Geostatistics Series).

FOSTER, et al. **Groundwater Quality Protection: A Guide for Water Service Companies, Municipal Authorities and Environment Agencies**. Banco Mundial: Washington:2002.

FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. C. A.. **Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data**. Lima: World Health Organization, Pan American Health Organization. Centre for Sanitary Engineering and Environmental Sciences. 1988. Technical Report.

LANDIM, P.M.B. **GEOEAS: um exemplo de aplicação em análise geoestatística**. DGA,IGCE,UNESP/Rio Claro, Lab. Geomatémática, Texto Didático 11, 41 pp. 2003. Disponível em <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>>. Acessado em 25 de abril de 2013.

LANDIM, P.M.B. & STURARO, J.R. **Krigagem indicativa aplicada à elaboração de mapas probabilísticos de riscos**. DGA,IGCE,UNESP/Rio Claro, Lab. Geomatémática,Texto Didático 06, 19 pp. 2002. Disponível em <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>>.Acesso em 02 de julho de 2013.

LANDIM, PAULO MILTON BARBOSA. **Análise estatística de dados geológicos**. Fundação Editora da UNESP. 1998.

Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo : escala 1:1.000.000 :nota explicativa / [coordenação geral Gerônimo Rocha]. - São Paulo : DAEE Departamento de Águas e Energia Elétrica : IG-Instituto Geológico : IPT Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo : CPRM Serviço Geológico do Brasil, 2005. Disponível em <<http://www.igeologico.sp.gov.br/downloads/Nota%20Explicativa%20Mapa%20Agua%20Subterraneas.pdf>>. Acessado em 20 de julho de 2013.

MATOS, I. S. **Aplicação de um modelo de balanço hídrico na Bacia do rio Jacaré-Guaçu**. 1987. 189f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1987.

MEAULO, F.J. **Vulnerabilidade natural à poluição dos recursos hídricos subterrâneos da área de Araraquara (SP)**. 2004. 108f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. 2004.

Ministério do Meio Ambiente. Disponível em < <http://www.mma.gov.br/>>. Acessado em 07 de março de 2013.

PEDROSA, Célio Augusto; CAETANO, Francisco A. **Águas Subterrâneas**. Agência Nacional de Águas (ANA). Brasília. 2002.

RABELO, J. L.. **Estudo da recarga do Aquífero Guarani no sistema Jacaré-Tietê**. 2006. 200f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2006.

SANTOS, M. M. **Avaliação Hidrogeológica para Determinação da Vulnerabilidade**

Natural do Aquífero Freático em Área Seleccionada na Cidade de Londrina (PR). 2005. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Rio Claro, 2005.

SCHNEIDER, R.L.; MÜHLMANN, H.; TOMMASI, E.; MEDEIROS, R. A.; DAEMON, R. F.; NOGUEIRA, A. A. **Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 1974, Porto Alegre. Anais XXVIII: Sociedade Brasileira de Geologia, v.1, p. 41-65.

Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos de São Paulo. Disponível em <<http://www.sigrh.sp.gov.br/>>. Acessado em 07 de julho de 2013.

SOARES, P.C.; LANDIM, P.M.B.; FÚLFARO, V.J.; SOBREIRO NETO, A.F. **Ensaio de caracterização estratigráfica do Cretáceo no Estado de São Paulo: Grupo Bauru.** Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, v.10, p.177-185, 1980.

SOIL MOISTURE EQUIPAMENT CORP. **2800K1 operating instructions.** Santa Barbara, CA, 1991. 27p.

VON STEMPVOORT, D.; EWERT, L.; WASSENAAR, L. **Aquifer vulnerability index: a GIS compatible method for groundwater vulnerability mapping.** *Canadian Water Resources Journal*, vol. 18, nº 1, p. 25-37, 1992.