

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Campus de Rio Claro

**IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE ZONAS DE CAPTURA E  
CONCENTRAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS A PARTIR DE PRODUTOS  
DE SENSORIAMENTO REMOTO**

Juliano Oliveira Martins Coelho

Orientador: Prof. Dr. Juércio Tavares de Mattos

Co-orientador: Prof. Dr. Jairo Roberto Jiménez-Rueda

Dissertação de Mestrado elaborada  
junto ao Programa de Pós-Graduação  
em Geociências e Meio Ambiente para  
obtenção do título de Mestre em  
Geociências.

Rio Claro - SP

2010

551.49 Coelho, Juliano Oliveira Martins  
C672i Identificação e caracterização de zonas de captura e concentração de  
águas subterrâneas a partir de produtos de sensoriamento remoto / Juliano  
Oliveira Martins Coelho. - Rio Claro : [s.n.], 2010  
107 f. : il., figs., quadros

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de  
Geociências e Ciências Exatas  
Orientador: Juércio Tavares de Mattos  
Co-Orientador: Jairo Roberto Jiménez-Rueda

1. Águas subterrâneas. 2. Vale do Paraíba do Sul. 3. Aquífero  
fraturado. 4. Compartimentação do meio físico. 5. Análise morfoestrutural.  
I. Título.

Ficha Catalográfica elaborada pela STATI - Biblioteca da UNESP  
Campus de Rio Claro/SP

## Comissão Examinadora

Prof. Dr. Juércio Tavares de Mattos  
Geólogo  
Departamento de Engenharia Civil  
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – FEG  
Universidade Estadual Paulista - UNESP

Prof. Dr. Sérgio dos Anjos Ferreira Pinto  
Geógrafo  
Departamento de Planejamento Territorial  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas – IGCE  
Universidade Estadual Paulista - UNESP

Prof. Dr. Tomoyuki Ohara  
Geólogo  
Divisão de Sensoriamento Remoto  
Coordenação Geral de Observação da Terra  
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Resultado: Aprovado

Rio Claro, 1º de Julho de 2010

Dedico este trabalho a todos os professores e alunos que passaram pela minha vida, colaborando de diversas formas com o meu aprendizado.

## **Agradecimentos**

Agradeço primeiramente à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pela bolsa de estudos concedida, sem a qual a presente pesquisa seria inviável.

Fico eternamente grato ao meu orientador Prof. Dr. Juércio Tavares de Mattos, pela dedicação, atenção e transparência na sua orientação e no compartilhamento de seus conhecimentos científicos e pessoais. Agradeço também ao meu co-orientador Prof. Dr. Jairo Roberto Jiménez-Rueda, pela confiança e apoio em todas as etapas da pesquisa. Espero um dia corresponder às expectativas e à dedicação desprendida por estes profissionais na minha formação.

Agradeço à Prof. Dra. Cenira Maria Lupinacci Cunha, pelas preciosas contribuições feitas a esta pesquisa em virtude da banca de qualificação. Ao Prof. Dr. Sérgio dos Anjos Ferreira Pinto e Prof. Dr. Tomoyuki Ohara, pela dedicação na participação da banca examinadora e pelas correções e contribuições feitas ao trabalho.

Agradeço à secretária da Pós-Graduação em Geociências, Rosângela Vacello, cuja atenção e competência sempre foram imprescindíveis, principalmente pelos inestimáveis avisos, conselhos e soluções com os trâmites legais da pós graduação.

Fica aqui também registrada a minha gratidão ao grande amigo Fabiano do Nascimento Pupim, companheiro de trabalho e de longas conversas, pelas inúmeras contribuições a esta pesquisa, especialmente na etapa de trabalho de campo. Minha profunda gratidão também a Gisele Silveira de Brito pelo apoio, preciosa ajuda e diversas horas desprendidas em formatações e correções nas etapas finais do trabalho.

Fico muito grato também pela compreensão de todos que foram afetados pela minha impaciência e ansiedade nos momentos mais difíceis da pesquisa, principalmente à amiga Paula Harumi Honda, que acompanhou de perto e sofreu muito com as minhas aflições, sempre me incentivou e deu muito apoio emocional e psicológico.

Agradeço ainda a todos que contribuíram de alguma forma para o desenvolvimento deste trabalho, seja direta ou indiretamente, mas que injustamente não listarei seus nomes por serem muitos.

Dedico especial gratidão aos meus pais, Gilberto Martins Coelho e Natalina Cecília de Oliveira Coelho, que mesmo à distância lutaram comigo todas as batalhas travadas, compartilhando a vitória e a derrota, os espólios e as feridas. Não há nada mais importante na vida do que ter pessoas em que se possa confiar plenamente, que nos inspire e nos fortaleça. A vocês dois, muito obrigado pelo apoio, companhia e amor incondicional.

“A ignorância afirma ou nega veementemente, a ciência duvida.”  
(Voltaire)

## Resumo

Os aquíferos subterrâneos são reservas estratégicas de recursos hídricos, devendo haver um planejamento adequado para o seu uso e conservação. As zonas de recarga e de concentração de água subterrânea são de suma importância na dinâmica dos sistemas aquíferos, sendo responsáveis, respectivamente, pelo reabastecimento e pelo armazenamento do recurso. Técnicas de fotointerpretação a partir de produtos de sensoriamento remoto podem ser muito úteis aos estudos hidrológicos, fornecendo informações relevantes a respeito do meio físico, principalmente em escala de reconhecimento. Assim, esta pesquisa tem como objetivo identificar e caracterizar as zonas de captura e concentração de águas subterrâneas em rochas cristalinas, a partir de técnicas de fotointerpretação em produtos de sensoriamento remoto. Para tal, foram estabelecidas unidades geoambientais, a partir da compartimentação do meio físico e posterior classificação de suas propriedades geotécnicas, e foi realizado também um mapeamento morfoestrutural de feições rúpteis e dúcteis. A combinação do Mapa de Unidades Geoambientais e do Mapa Morfoestrutural resultou no Mapa de Zonas de Captura e Concentração de Águas Subterrâneas, onde a convergência de evidências favoráveis à infiltração, percolação e concentração de águas indica as potenciais zonas de recarga, circulação e concentração de águas subterrâneas, colaborando com a prospecção e com o planejamento do uso deste recurso. As principais zonas de recarga e de concentração de recursos hídricos identificadas pelo mapeamento foram o Alto Estrutural de Natividade da Serra, potencialmente uma excelente zona de recarga, e o Baixo Estrutural de Lagoinha/São Luis do Paraitinga, com grande potencial à concentração de recursos hídricos. Estudos de maior detalhe nas áreas potenciais identificadas pelo mapeamento podem confirmar, ou não, a presença do recurso hídrico, direcionando ações de planejamento ambiental e de exploração de água.

Palavras-chave: Aquífero fraturado. Sensoriamento remoto. Compartimentação do meio físico. Análise morfoestrutural.

## **Abstract**

The fractured aquifers are strategic reserves of water resources, and there should be proper planning for its use and conservation. Areas of concentration and recharge of groundwater is of paramount importance in the dynamics of aquifer systems, responsible respectively for storage and replenishment of the resource. Photointerpretation techniques from remote sensing products can be very useful for hydrological studies, providing relevant information about the physical environment, especially in wide recognition. Thus, this research aims to identify and characterize areas of capture and concentration of groundwater in crystalline rocks, from photointerpretation techniques in remote sensing products. For such geoenvironmental units were established from the partitioning of the physical environment and subsequent classification of their geotechnical properties, and was also performed a morphostructural mapping of brittle and ductile features. The combination of the Geoenvironmental Units Map and the Morphostructural Map resulted in the Groundwater Capture and Concentration Map, where the convergence of evidence favorable to infiltration, percolation and water concentration indicates potential areas of recharge, movement and concentration of groundwater, collaborating with the prospecting and planning of the use of this resource. The main areas of recharge and concentration of water resources were identified by mapping the High Structural of Natividade Sierra, potentially an excellent recharge area, and the Lower Structural of Lagoinha/São Luis do Paraitinga, with great potential to the concentration of water resources. Studies in greater detail of the potential areas identified by the mapping can confirm whether or not the presence of water resource, directing the actions of environmental planning and exploitation of water.

**Keywords:** Fractured aquifer. Remote sensing. Partitioning of the physical environment. Morphostructural analysis.

## Índice de figuras

Figura 1 - Área de Estudo, com os municípios destacados por cores.....	3
Figura 2 - Representação do mapa de geológico da área de estudo.....	6
Figura 3 - Representação do mapa geomorfológico da área de estudo.....	14
Figura 4 - Representação do mapa hipsométrico da área de estudo.....	16
Figura 5 - Representação do mapa pedológico da área de estudo.....	17
Figura 6 - Classificação das formas anômalas de drenagem.....	27
Figura 7 - Rede de drenagem da área de estudo.....	37
Figura 8 - Imagem ETM+ Landsat 7, banda 8, referente à área de estudo.....	39
Figura 9 - Distribuição das classes de densidade textural.....	41
Figura 10 - Distribuição das classes de Alterabilidade.....	43
Figura 11 - Distribuição das classes de Ruptibilidade.....	45
Figura 12 - Distribuição das classes de tropia.....	46
Figura 13 - Distribuição das classes de Permeabilidade.....	48
Figura 14 - Representação do Mapa de Unidades Geoambientais.....	51
Figura 15 - Representação do Mapa de Contorno Estrutural.....	53
Figura 16 - Contorno Morfoestrutural de parte da área de estudo.....	55
Figura 17 - Representação do mapa de lineamentos estruturais.....	57
Figura 18 - Mapa de Densidade de Cruzamentos de Lineamentos Estruturais e Densidade de Juntas e respectivos eixos de maior densidade.....	58
Figura 19 - Representação do Mapa de Juntas.....	60
Figura 20 - Zonas de Variação de Máximo 1 e Máximo 2.....	62
Figura 21 - Mapa Síntese Morfoestrutural.....	64
Figura 22 - Localização dos pontos de campo.....	66
Figura 23 - Fraturas abertas, em rocha migmatítica, formando série com espaçamento de 20 cm. Ponto 09, rumo da foto: azimuth 40.....	68
Figura 24 - Fraturas em rocha do tipo quartzo muscovita xisto, formando séries e sistemas conjugados, na forma de diedros de rompimento. Ponto 11, rumo da foto: azimuth 250.....	69
Figura 25 - Fraturas em rocha xistosa, abertas, preenchidas por argila, formando sistema conjugado. Ponto 04, rumo da foto: azimuth 75.....	70
Figura 26 - Xisto com foliação 70/80NW. Ponto 10, rumo da foto: azimuth 95.....	71

Figura 27 - Corpo granítico apresentando relevo do tipo convexo, entre os municípios de Redenção da Serra e Natividade da Serra.....	72
Figura 28 - Relevo do tipo côncavo-convexo em primeiro plano e côncavo-retilíneo-convexo ao fundo. Município de Lagoinha. ....	73
Figura 29 - Mapa de Zonas de Captura e Concentração de Águas Subterrâneas.....	75

## Índice

Agradecimentos.....	iv
Resumo.....	vii
Abstract.....	viii
Índice de figuras.....	ix
Índice.....	xi
CAPÍTULO I.....	1
1.1 Introdução.....	1
1.2 Objetivo.....	2
1.3 Localização da área de estudo.....	3
CAPÍTULO II.....	4
2 Caracterização da Área de Estudo.....	4
2.1 Aspectos Geológicos.....	4
2.1.1 O Embasamento Cristalino.....	5
2.1.1.1 Complexo Costeiro.....	5
2.1.1.2 Complexo Paraíba do Sul.....	7
2.1.1.3 Grupo Açungui.....	7
2.1.1.4 Grupo São Roque.....	7
2.1.1.5 Rochas Granitóides.....	8
2.1.2 Manifestações Ígneas Mesozóicas-Cenozóicas.....	8
2.1.3 A Bacia Sedimentar de Taubaté.....	8
2.1.3.1 Formação Tremembé.....	9
2.1.3.2 Formação Caçapava.....	10
2.1.4 Aspectos Estruturais.....	10
2.2 Aspectos Geomorfológicos.....	12
2.3 Aspectos Pedológicos.....	15
2.4 Aspectos Climáticos.....	19
CAPÍTULO III.....	22

3 Fundamentação Teórica.....	22
3.1 Análise de Elementos do Meio Físico com Produtos de Sensoriamento Remoto.....	22
3.1.1 Análise Textural.....	23
3.1.2 Propriedades do Meio Físico.....	24
3.1.3 Mapeamento Morfoestrutural.....	26
3.1.4 Análise de Fraturamentos.....	27
3.1.4.1 Lineamentos Estruturais.....	27
3.1.4.2 Traços de Juntas.....	28
3.2 O Uso de Produtos de Sensoriamento Remoto no Estudo de Aqüíferos ...	28
CAPÍTULO IV.....	31
4 Materiais e Método.....	31
4.1 Materiais.....	31
4.2 Método.....	32
4.2.1 Mapeamento das Unidades Geoambientais.....	32
4.2.1.1 Densidade Textural.....	33
4.2.1.2 Alterabilidade.....	33
4.2.1.3 Ruptibilidade.....	34
4.2.1.4 Tropa.....	34
4.2.1.5 Permeabilidade.....	35
4.2.2 Mapa Morfoestrutural.....	35
4.2.2.1 Análise das Deformações Rúpteis.....	35
4.2.2.1.1 Traços de Juntas.....	35
4.2.2.1.2 Lineamentos Estruturais.....	36
4.2.2.2 Análise das Deformações Dúcteis.....	36
4.2.3 Cartografia de Síntese – Mapa de Zonas de Captura e Concentração de Águas Subterrâneas.....	37
4.2.3 Tratamento das Imagens.....	38
CAPÍTULO V.....	40

5 Resultados e Discussões .....	40
5.1 Compartimentação do Meio Físico .....	40
5.2 Mapeamento Morfoestrutural.....	52
5.2.1 Deformações Dúcteis .....	52
5.2.1.1 Contornos Estruturais .....	52
5.2.2 Deformações Rúpteis .....	55
5.2.2.1 Lineamentos Estruturais.....	56
5.2.2.2 Traços de Juntas .....	59
5.2.2.2.1 Zonas de variação de máximos 1 e 2.....	61
5.3 Trabalho de Campo.....	65
5.4 Mapa de Zonas de Captura e Concentração de Águas Subterrâneas .....	73
CAPÍTULO VI .....	78
6 Conclusões.....	78
Anexos .....	87

## **CAPÍTULO I**

### **1.1 Introdução**

Os recursos hídricos são escassos e mal distribuídos pelo planeta Terra, o que gera a necessidade de um uso planejado e voltado à racionalização e preservação das reservas de água. Neste sentido, os aquíferos subterrâneos se mostram extremamente estratégicos por serem as maiores reservas de água doce líquida disponível ao consumo humano. Assim, é necessário que os órgãos responsáveis pela gestão dos recursos hídricos tenham acesso a informações sobre a dinâmica dos aquíferos subterrâneos, com a finalidade de planejar as ações antrópicas que possam vir a afetar a qualidade e quantidade de água disponível ao consumo.

No planejamento do uso de um sistema aquífero deve-se tomar especial atenção com as zonas de recarga, onde há o reabastecimento da reserva, e também com as zonas de concentração de água, onde há uma maior abundância do recurso. São dois pontos onde há grande risco de comprometimento do aquífero no caso de exposição à ação de contaminantes, e no caso da zona de recarga do aquífero há ainda o risco da sua impermeabilização e impedimento da reposição da água.

A utilização de imagens de sensoriamento remoto pode contribuir no estabelecimento de planos de manejo de aquíferos, através da análise de feições de superfície indicadoras destes reservatórios subterrâneos, principalmente através da compartimentação e caracterização do meio físico a partir dos elementos texturais de relevo e de drenagem, analisados em imagens aéreas e orbitais. Tais elementos indicam áreas favoráveis ou desfavoráveis à recarga dos aquíferos, bem como áreas favoráveis à circulação e concentração de águas subterrâneas. As técnicas de fotointerpretação geram informações que podem ser representadas em diversas escalas e expressar as propriedades do meio físico mais pertinentes à investigação realizada.

Surge assim a necessidade de reconhecer quais propriedades do terreno são de maior relevância aos estudos de recursos hídricos subterrâneos e quais métodos investigativos melhor evidenciam tais propriedades, de modo a otimizar a eficiência das técnicas fotointerpretativas como fonte de conhecimento a respeito da dinâmica dos aquíferos subterrâneos.

## **1.2 Objetivo**

Esta pesquisa tem como objetivo indicar zonas de captura e concentração de águas subterrâneas a partir de técnicas de fotointerpretação, com o uso de produtos de sensoriamento remoto e indicar quais propriedades do meio físico e elementos morfoestruturais estão mais fortemente envolvidos no processo de recarga e acumulação de água em aquíferos fraturados.

Para alcançar o objetivo geral foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Identificar as zonas de recarga e descarga dos aquíferos a partir do Mapa de Zonas de Captura e Concentração de Águas Subterrâneas, Análise de Fraturas e Mapa Morfoestrutural.
- Caracterizar as principais zonas de captura, circulação e concentração de águas subterrâneas identificadas no mapeamento.
- Conduzir análise e integração dos elementos morfoestruturais envolvidos no mapeamento e avaliar a sua contribuição nas pesquisas de captura, circulação e concentração de águas subterrâneas.

### 1.3 Localização da área de estudo

A área de estudo possui aproximadamente 4.250 km<sup>2</sup> de extensão e localiza-se na região leste do Estado de São Paulo, no Alto-médio Vale do Rio Paraíba do Sul, entre os meridianos 45°00' W e 45°45' W, e paralelos 23°00' S e 23°30' S, como apresentado na Figura 1. A área de estudo envolve os municípios de Aparecida, Caraguatatuba, Caçapava, Cunha, Guaratinguetá, Jambuí, Lagoinha, Natividade da Serra, Paraibuna, Pindamonhangaba, Redenção da Serra, Roseira, São José dos Campos, São Luís do Paraitinga, Taubaté, Tremembé e Ubatuba. As principais vias de acesso são as rodovias: Presidente Dutra (BR 116 / SP 062), Carvalho Pinto (SP 070), Rodovia dos Tamoios (SP 099), Oswaldo Cruz (SP 125) e Manoel Hyppolito Rego (SP 055).

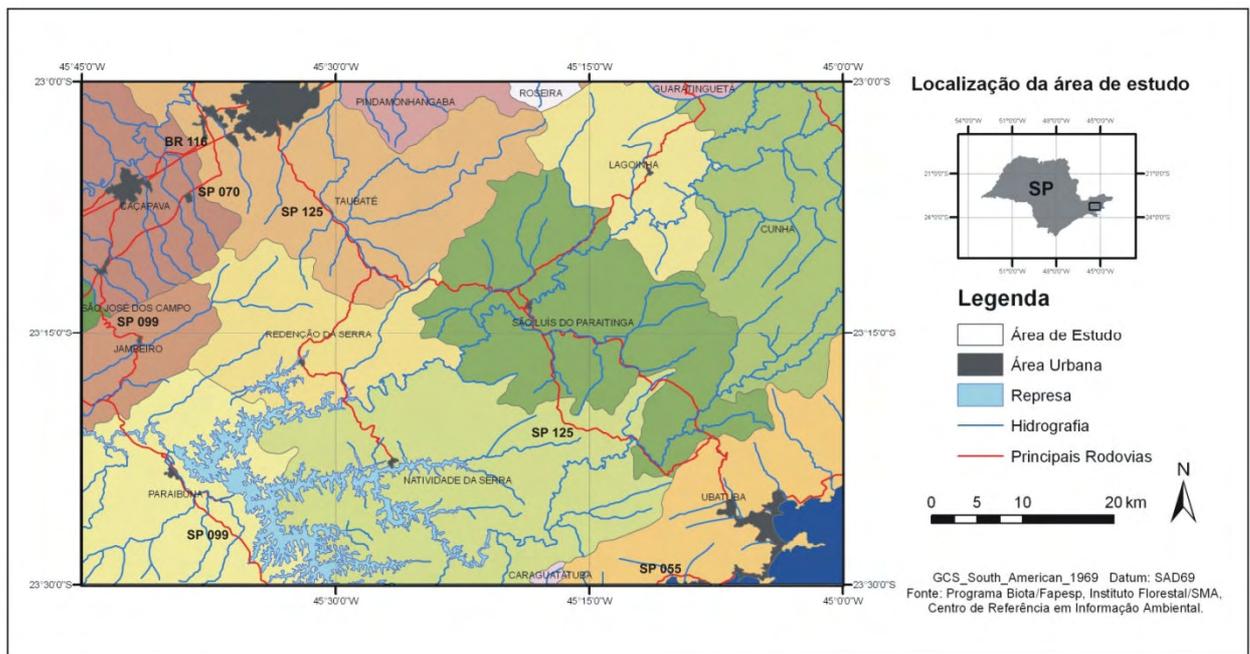


Figura 1 - Área de Estudo, com os municípios destacados por cores.

## CAPÍTULO II

### 2 Caracterização da Área de Estudo

A área de estudo será brevemente apresentada neste capítulo, considerando os aspectos geológicos, geomorfológicos, pedológicos e climáticos.

#### 2.1 Aspectos Geológicos

O Alto-médio Vale do Paraíba do Sul está inserido na região definida por Schobbenhaus (1984) como Região de Dobramentos Sudeste, cujas unidades litoestruturais foram provavelmente acumuladas durante o Proterozóico Superior e posteriormente afetadas pelo Ciclo Brasileiro. Já os complexos litoestruturais foram consolidados no Arqueano e Proterozóico Inferior e retrabalhados em ciclos termotectônicos pré e sin-brasileiros. Hasui et al. (1984) consideram para a região uma evolução policíclica e polimetamórfica, a partir de evidências geodinâmicas e geoquímicas. A partir do Jurássico Superior, com o processo de separação continental afetando a placa Sul-Americana, ocorre a formação do *East Brazilian Rift System* (CHANG et al., 1992) e a abertura do Oceano Atlântico Sul, associada a

intensa atividade magmática caracterizada pelos extensos derrames da Formação Serra Geral, pelas rochas básicas do embasamento das bacias marginais e pela abundância de diques máficos por toda região sul-sudeste do Brasil.

Durante o Cenozóico foram criadas condições para a implantação de bacias de sedimentação exclusivamente continental flúvio-lacustre. Almeida (1976) nomeia como Sistema de Rifts da Serra do Mar (SRSM) o conjunto de bacias tafrogênicas de idade cenozóica localizadas na porção sudeste do Brasil, caracterizadas por formas alongadas orientadas segundo ENE e acompanhando os principais traços estruturais do embasamento cristalino da região. No Sistema de Rifts da Serra do Mar estão incluídas, além da Bacia de Taubaté, as bacias de Curitiba, São Paulo, Resende e Volta Redonda, que segundo Riccomini (1989) constituiriam, durante sua formação, uma única depressão alongada, a qual deu o nome de Rift Continental do Sudeste Brasileiro. Tais bacias possuem sedimentação de origem continental, caracterizadas por depósitos pelíticos de ambiente lacustre, com presença de fósseis característicos de ambiente continental.

O embasamento cristalino é representado na área de estudo pelos complexos Costeiro e Paraíba do Sul, e pelos grupos Açungui e São Roque, e ainda por Rochas Granitóides. Diques de rochas básicas de idades entre o Jurássico e Cretáceo encontram-se encaixadas nestes complexos antigos, e ocorrem ainda sedimentos terciários da Formação Resende e Caçapava. Os litotipos presentes na área de estudo podem ser observados na Figura 2.

## **2.1.1 O Embasamento Cristalino**

### **2.1.1.1 Complexo Costeiro**

Segundo Almeida & Hasui (1984) as rochas do complexo costeiro são delimitadas ao norte pela Falha de Cubatão e ao Sul pela linha de costa e constituem-se basicamente de gnaisses diversos, migmatitos e granitos. Possuem associações máfica e ultra-máficas, granulitos e intercalações de metassedimentos. A abundante presença de migmatitos é considerada resultado da sucessão dos ciclos Jequié, Transamazônico e Brasileiro. As rochas do complexo costeiro teriam se originado no Arqueano e retrabalhadas nos ciclos posteriores. Schobbenhaus et al. (1984) coloca que as rochas mais comuns são gnaisses e migmatitos de

estrutura bandada e facoidal, com intercalações em menor proporção de calcossilicáticas, calcários, metavulcânicas, formações ferríferas, quartzitos e magnetita quartzitos. São descritos ainda diversos corpos máficos e ultramáficos, bem como xistos magnesianos, dioritos, monzolitos e sienitos. Rochas de fácies granulitos aparecem na forma de faixa, bolsões e núcleos esparsos, incluindo charnoquitos, leptinos e enderbitos.

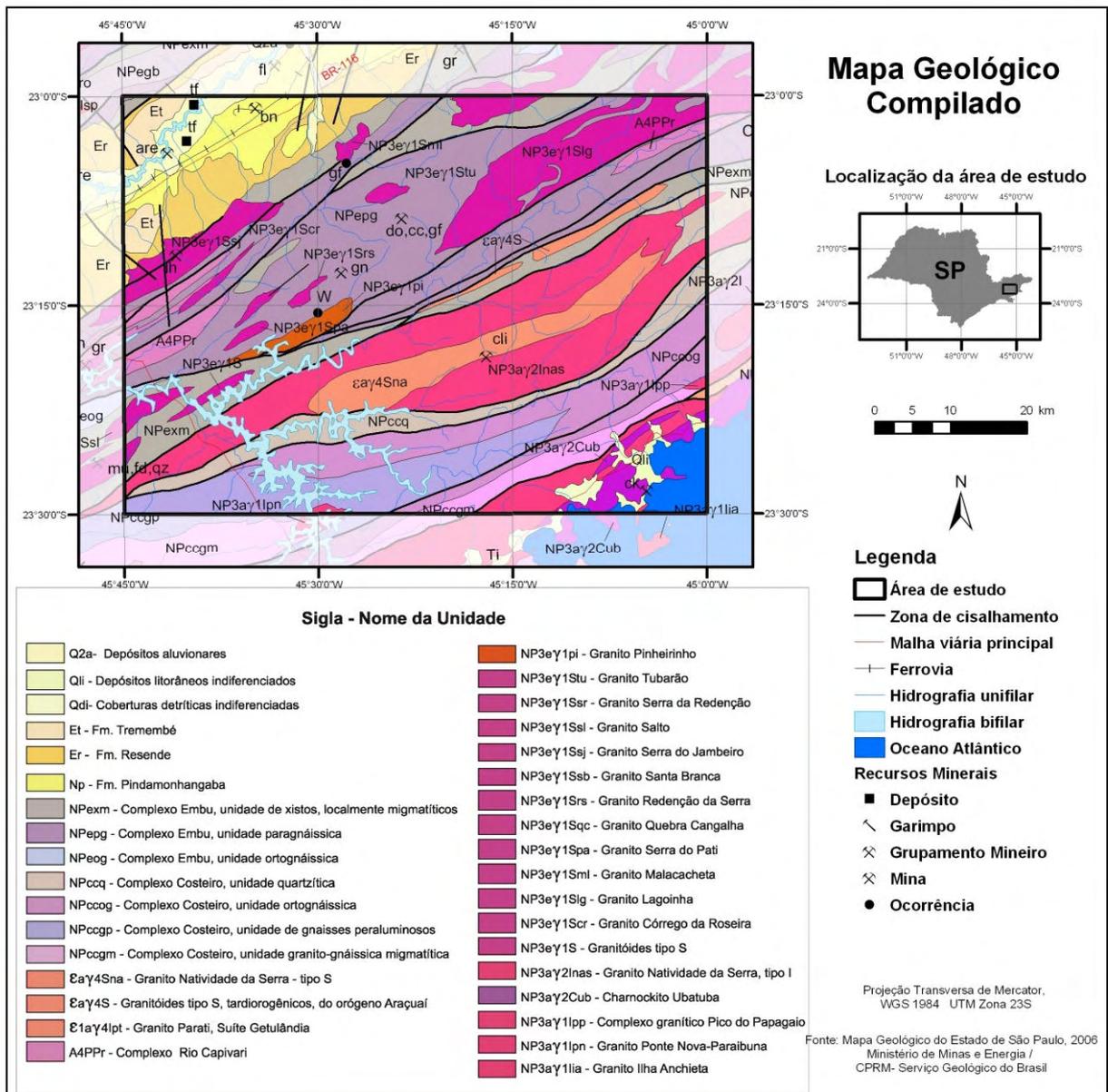


Figura 2 - Representação do mapa de geológico da área de estudo (CPRM, 2006).

### **2.1.1.2 Complexo Paraíba do Sul**

O Complexo Paraíba do Sul (SCHOBENHAUS et al. 1984) corresponde às rochas existentes entre as falhas de Camanducaia e Jundiuvira, representadas por gnaisses e migmatitos diversos, bandados e oftálmicos, com diferentes graus de migmatização, intercalações de metassedimentos e injeções granitóides. São encontradas ainda rochas calcissilicáticas, mármores dolomíticos, xistos feldspáticos, calcixistos, talcoxisto e metabasitos intercalados. Segundo Santoro et al. (1991) este complexo possui sua origem no Proterozóico Inferior, posteriormente retrabalhados no ciclo Brasileiro.

### **2.1.1.3 Grupo Açungui**

O grupo Açungui constitui uma faixa alongada, quase paralela à linha de costa que se estende desde o estado do Paraná até o estado do Rio de Janeiro e representa a mais extensa unidade do pré-cambriano paulista. Na área de estudo o grupo se limita a norte pelas falhas de Taxaquara, Monteiro Lobato e Jundiuvira e sul pela falha de Cubatão e o lineamento do Além-Paraíba. Há dificuldades na divisão estratigráfica da unidade devido à passagem transicional com feldspatização progressiva dos metassedimentos de fácies xisto verde e as rochas gnáissico-migmatíticas de fácies anfibolito, subordinadamente granulito (IPT, 1981). A separação do grupo em conjuntos litológicos foi proposta por Hasui & Sodowski (1976) que caracterizam estas rochas como complexos, denominando os migmatitos e gnaisses migmatizados como Complexo Embu e os metassedimentos como Complexo Pilar. O Complexo Embu correspondente aos níveis inferiores do Grupo Açungui e o Complexo Pilar que corresponde aos níveis superiores.

### **2.1.1.4 Grupo São Roque**

O grupo São Roque é limitado a norte pelas falhas de Itu e Jundiuvira, a sul pela falha de Taxaquara e a leste-nordeste pela cunha que se forma pelas falhas de Monteiro Lobato e Jundiuvira. É representada por metassedimentos, constituídos por metapelitos, metapsamitos, rochas carbonáticas, metabasitos e uma sequência migmatítica com estruturas diversas. Idades radiométricas indicam valores em torno

de 640 M.a. pra os metassedimentos e rochas graníticas intrudidas, propondo assim idade brasileira (IPT, 1981).

#### **2.1.1.5 Rochas Granitóides**

A maior parte das rochas granitóides está associada aos pacotes supracrustais do Proterozóico Superior (HASUI et al. 1978) e constituem diques, stocks e batólitos numerosos. A maior parte do embasamento cristalino paulista está relacionada às rochas granitóides, sendo identificadas várias suítes de acordo com a sua estruturação interna e maior ou menor relação temporal ou geográfica com as grandes estruturas que compartimentam a região, sendo classificados em sin, tardi, ou pós-tectônicos. Na área do Alto-médio Paraíba do Sul são encontrados somente corpos graníticos classificados como sintectônicos, subdivididos em fácies Migmatítica e fácies Cantareira (HASUI et al., 1978).

#### **2.1.2 Manifestações Ígneas Mesozóicas-Cenozóicas**

A partir do Jurássico Inferior, a porção sudeste da Plataforma Sul-Americana apresentou uma grande atividade tectono-magmática, culminando com a ruptura da plataforma continental e abertura do oceano atlântico, formando o *East Brazilian Rift* (CHANG et al., 1992). Tais manifestações passaram do vulcanismo basáltico, representado pela Formação Serra Geral na bacia do Paraná, para o magmatismo alcalino, que teve duração desde o Jurássico até o Eoceno e está representado principalmente na porção costeira do sudeste brasileiro.

#### **2.1.3 A Bacia Sedimentar de Taubaté**

A Bacia Sedimentar de Taubaté é de origem terciária, formada em um gráben entre a serra do Mar e a serra da Mantiqueira, limitada a norte pela falha do Buquira e ao sul pela falha do Alto da Fatura (HASUI et al., 1978). Possui um comprimento de 173 km e largura de 15 a 20 km, recobrendo uma área de 2.400 km<sup>2</sup>. Segundo Hasui (op. cit.) constitui o registro mais extenso e de maior espessura da sedimentação cenozóica continental da região sudeste do Brasil.

O primeiro autor a reconhecer a existência de dois pacotes sedimentares foi Washburne (1930), que trata os sedimentos como um pacote inferior pelítico e um superior arenoso, denominados por ele como Estratos Terciários do Paraíba. Moraes Rego (1933) denomina os pacotes como Camadas Paraíba do Sul (pacote superior) e Camadas São Paulo (pacote inferior).

Almeida (1952) apud Ohara (1995) nomeia os folhelhos da região de Taubaté-Tremembé como Formação Tremembé, recoberta pela Formação São Paulo na forma de uma discordância erosiva. Carneiro et al. (1976) designou como formação Caçapava os depósitos de canais e planícies de rios anastomosados na região de São José dos Campos e Caçapava.

Na coluna estratigráfica proposta por Hasui & Ponçano (1978) são agrupadas no Grupo Taubaté (MEZZALIRA, 1962) a Formação Tremembé (ALMEIDA op. cit.) e a Formação Caçapava (CARNEIRO op. cit.). Partindo desta proposta Vespucci (1984) propõe a inserção da Formação Jacareí no grupo Taubaté, representada pelos depósitos de leques aluviais não descritos por Carneiro et al. (1976).

Uma revisão litoestratigráfica do Setor São Paulo - Volta Redonda é realizada por Riccomini (1989). O autor assume uma ligação pretérita entre as bacias do setor e designa Formação Resende os depósitos de leques aluviais, associados a planícies aluviais de rios entrelaçados, que ocorrem em todas as bacias. Ocorreria, associado a este sistema fluvial, um sistema lacustre para o qual foi mantido o nome Formação Tremembé. As duas formações formariam o Grupo Taubaté junto com a Formação São Paulo, de sistema fluvial meandrante, e os derrames de basanita na Bacia de Volta Redonda. Os depósitos de sistema fluvial meandrante da porção central da Bacia de Taubaté receberam o nome de Formação Pindamonhangaba, e apresentam discordância basal sobre os argilitos esverdeados da Formação Tremembé.

### **2.1.3.1 Formação Tremembé**

A Formação Tremembé é constituída predominantemente por folhelhos e argilitos de cores normalmente acinzentadas, com pequenas intercalações de arenitos, siltitos e brechas intraformacionais. Os folhelhos apresentam níveis pirobetuminosos (CAMPOS, 1952), sendo objetos de diversos estudos voltados para a análise da viabilidade da sua exploração econômica. Os sedimentos indicam ser

de depósitos pelíticos em ambiente lacustre fortemente redutor, com intercalações mais grosseiras de origem fluvial, evidenciados pela presença de pelotas de argila e de estratificação cruzada (HASUI et al., 1978b).

### **2.1.3.2 Formação Caçapava**

Anteriormente denominada Formação São Paulo (MEZZALIRA, 1962), esta unidade abrange sedimentos arenosos e siltsos, com intercalações pelíticas, de cores cinza, amarela e vermelha. Tais sedimentos são caracterizados por certa imaturidade textural e mineralógica e apresentam-se em camadas plano-paralelas ou lenticulares, em que se notam estruturas hidrodinâmicas, caracterizando ambiente fluvial (IPT/PRÓ-MINÉRIO, 1981). A estrutura atual seria resultado de relações tectônicas de abatimento por falhas durante e após a evolução sedimentar. O adernamento regional das camadas no sentido noroeste e possivelmente o aparecimento de manchas de rochas do embasamento aflorantes no interior da bacia, também são resultados de tal abatimento tectônico.

### **2.1.4 Aspectos Estruturais**

As feições estruturais mais significativas são as zonas de cisalhamento dúctil, de larguras que podem ser quilométricas e comprimentos que chegam a centenas de quilômetros. Segundo Hasui et al. (1977) estas falhas estiveram ativas até o fim do ciclo Brasileiro, com caráter transcorrente, produzindo uma estruturação em blocos e se sujeitaram a falhamentos normais durante a Reativação Wealdeniana da Plataforma Sul Americana. As estruturas geradas compartimentam todo o embasamento cristalino, na forma de blocos com formas alongadas e sigmóides.

Ocorre predominância de falhas transcorrentes destrais, separando blocos com características metamórfico-estruturais muitas vezes distintas. Paralelamente às principais zonas de cisalhamento se desenvolvem estruturas de menor porte também reativadas na ruptura da crosta durante o Mesozóico. São reconhecidos também sinclinais e anticlinais apertados, relacionados sobretudo às suprascrustais deformadas no Ciclo Brasileiro.

As grandes e principais falhas apresentam direções NE e são denominadas: Jundiuvira (HASUI et al. 1969); Buquira (CARNEIRO, 1977); Taxaquara (HENNIES et al., 1967); Natividade e Alto da Fartura (CAVALCANTE & KAEFER, 1974).

Segundo Riccomini (1989) os principais sistemas de lineamentos na região são:

- **Sistema ENE a E-W** - Paralelo às principais zonas de cisalhamento Pré-cambriana, que tendem a dar a forma dos limites das bacias do Sistema de Rifts da Serra do Mar (SRSM).
- **Sistema NNE** - Oblíquo aos eixos das bacias do SRSM, participando da compartimentação interna das bacias.
- **Sistema NNW** - Sub-paralelo ao eixo das bacias do SRSM, controlando junto com o sistema NNE os compartimentos internos das bacias.
- **Sistema WNW** - Formando a Soleira de Queluz e Floriano-Barra Mansa.

Borges et al. (1998) caracteriza a área por meio de lineamentos E-W, WNW-ESSE e WSW-ENE, drenagens E-W com padrões retangular-angulado, subparalelo e paralelo, e falhas transcorrentes dextrais E-W, WNW-WSSE e WSW-ESSE formando sistemas de cordões sigmóides transtensivos e transpressivos, e estruturas transtensionais em cunha e romboédricas associadas.

Hasui et al. (1998) ao analisar a evolução morfotectônica do sudeste brasileiro coloca que o Mesosóico-paleógeno é caracterizado por soerguimento regional ligado à Reativação Sul-Atlântica. Nessa etapa evolutiva, o Oligoceno é marcado pela atividade de falhas normais NE-SW inclinadas para SE, impondo desnivelamento de blocos, gerando grábens terciários e delineando as serras da Mantiqueira e do Mar. O Neógeno-quadernário é individualizado em vários compartimentos com dominância de estruturas transpressivas, transtensivas e direcionais. Falhas inversas de transpressão reativaram estruturas pré-existentes e soergueram blocos estreitos e alongados nas direções NE-SW e ENE-WSW.

Assim, a evolução morfotectônica mesosóica-paleogênica vincula-se a um regime extensional relacionado com a fragmentação do Gondwana e a morfotectônica neogênica-quadernária reflete um regime tectônico intraplaca com movimentação transcorrente.

## 2.2 Aspectos Geomorfológicos

Partindo da classificação proposta por Almeida (1964), a área de estudo está localizada na província geomorfológica Planalto Atlântico, com presença de uma porção da Província Costeira, ao sul da escarpa da serra do Mar. Da província Planalto Atlântico, estão presentes na área as zonas Planalto do Paraitinga e Médio Vale do Paraitinga, sendo que do médio vale do Paraíba está presente a subzona Morros Cristalinos a subzona Bacia de Taubaté, de forma tal que os morros cristalinos formam um entreposto entre a Bacia de Taubaté e o Planalto do Paraitinga. Da província costeira está presente na área de estudo a zona Serraria Costeira com a subzona Serra do Mar, correspondente às escarpas da Serra do Mar e a zona Baixadas Litorâneas. A seguir é apresentado um resumo da descrição feita por Almeida (1964) a respeito destas zonas:

- Planalto do Paraitinga – se apresenta como um planalto cristalino muito dissecado, cujo rebordo sul é representado pela Serra do Mar e seu limite norte corresponde ao divisor de águas das bacias dos rios Paraitinga e Paraíba. Predominam relevos de espigões com cimos ondulados e traçados sinuosos orientados segundo os lineamentos estruturais. A drenagem corre em sentido do reverso continental da Serra do Mar, e seu padrão de drenagem é muito diversificado, desenvolvido em vales estreitos sem planícies aluviais marcantes e com presença de corredeiras devido à alta declividade. Os rios principais adotam orientação ENE, se adaptando às faixas de gnaisses menos resistentes e de micaxistos, representando também em seus pequenos cursos adaptação às direções de fratura NNW. O relevo de mar de morros apresenta um subnivelamento dos topos, podendo ser atribuído a um ciclo de erosão, cuja superfície de aplainamento se inclina em direção a jusante do rio Paraitinga, descendo desde 1000 m na região de cunha a 850 metros na região de Paraíba, tal superfície de erosão teria se desenvolvido antes da deposição das camadas superiores da bacia de Taubaté.
- Médio Vale do Paraíba – tem a forma de uma depressão alongada, com relevo de colinas e baixos morros que separam o Planalto do Paraitinga das escarpas da Serra da Mantiqueira. É formada pela subzona dos morros

cristalinos, com altitudes de cerca de 1000 m e estruturas predominantemente gnáissicas, com ocorrência de micaxistos e forte presença de granitos. É formada também pela subzona da bacia de Taubaté, cujo relevo suavizado de baixas chapadas e amplas colinas atinge altitude máxima de cerca de 700 m, desenvolvidos em sedimentos quase que inteiramente detríticos, dispostos em camadas horizontais deformadas por falhamentos. Os morros cristalinos também representam a paisagem de mar de morros, porém com alturas menores que as do planalto do Paraitinga, com perfis muito suavizados e drenagem labiríntica influenciada pela estrutura da rocha. Os morros cristalinos apresentam ainda “garupas” alongadas em direção NE refletindo a orientação dos gnaisses.

- Serraria Costeira – é representada na área de estudo pela subzona Serra do Mar, descrita como uma escarpa erosiva, com elevações acima de mil metros, mantidas pela sua constituição granítico-gnáissica. Apresenta escarpas jovens, com perfis mais ou menos retilíneos e com grandes declives, divididos pelo processo erosivo na forma de grandes espigões que avançam em direção às baixadas, perdendo altura e se suavizando, alguns destes espigões atingindo o mar na forma de promontórios. As principais escarpas da serra do Mar são sustentadas por rochas resistentes, enquanto que os vales subseqüentes são resultado de erosão remontante nas faixas de rochas menos resistentes aos processos erosivos. A drenagem se dá na forma de rios declivosos e encachoeirados que correm em direção ao mar.
- Baixadas Litorâneas – apresenta relevos com altitudes abaixo de 70 m, dispostos na forma de áreas descontínuas à beira-mar, representados por sedimentos detríticos não mais antigos que o pleistoceno. Os terraços marinhos e vales fluviais maiores apresentam efeitos de oscilações glácio-eustáticas do nível do mar.

Para reconhecer as feições geomorfológicas em uma escala de maior detalhe foi utilizado o Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo (ROSS; MOROZ, 1997), representado na Figura 3.

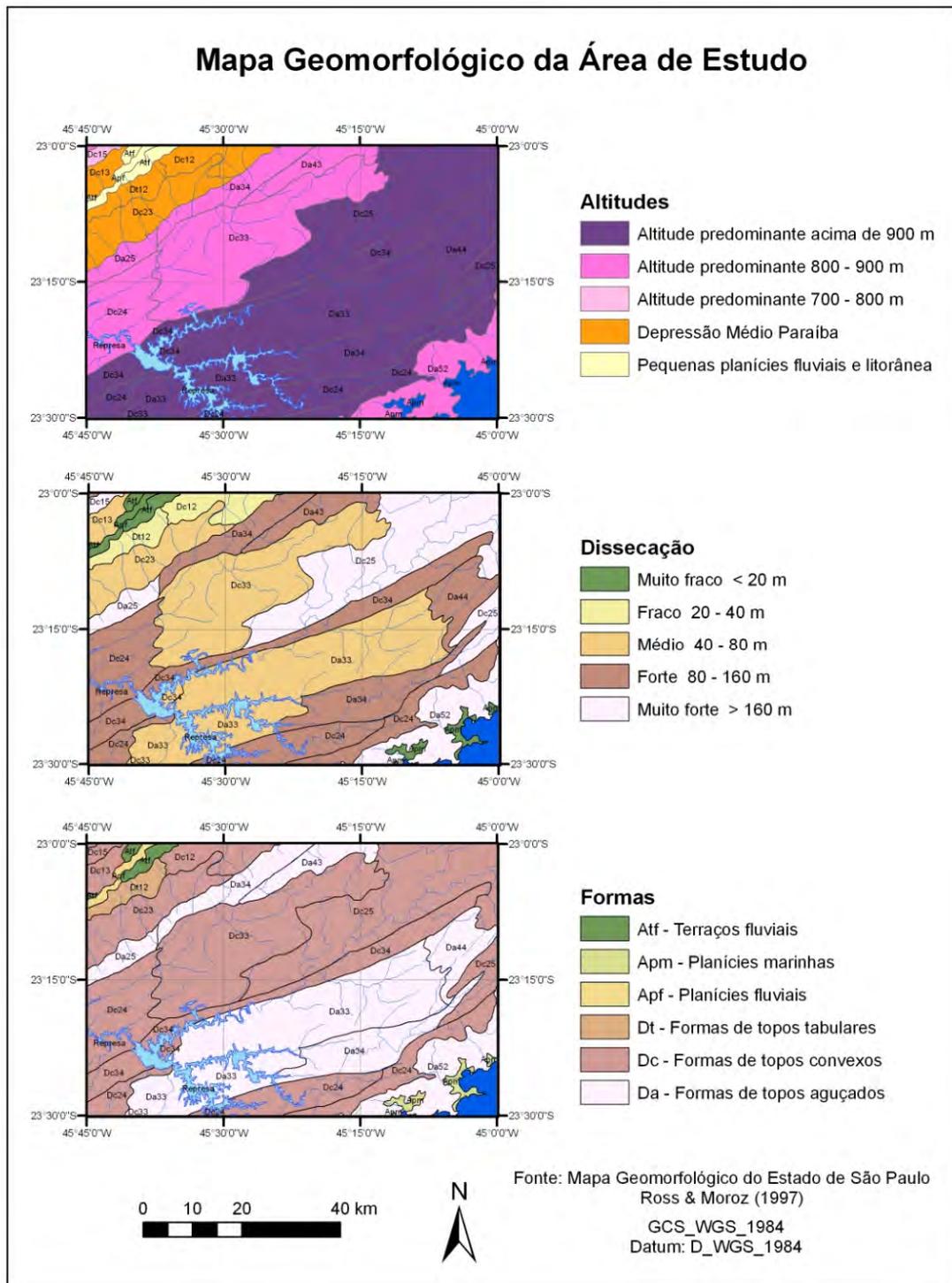


Figura 3 - Representação do mapa geomorfológico da área de estudo.

Este mapeamento conta também com três níveis hierárquicos em sua taxonomia, sendo a Unidade Morfoestrutural, Unidade Morfoescultural e Unidades de Relevo Regional. A área de estudo está em sua maior parte inserida na Unidade Morfoestrutural Cinturão Orogênico do Atlântico, representada na área pela Unidade Morfoescultural Planalto Atlântico, com as Unidades de Relevo Regional:

Planalto do Paraitinga/Paraibuna;  
Escarpa/Serra do Mar e Morros Litorâneos;  
Planalto do Médio Vale do Paraíba.

Uma pequena parte da área de estudo pertence à Unidade Morfoestrutural Bacias Sedimentares Cenozóicas, representada pela Unidade Morfoescultural Depressão do Médio Paraíba e pela Planície Litorânea Litoral Norte. Os autores classificam as unidades mapeadas por meio de três características principais: Altitude Média, Dissecação do Relevo e Forma de Topo.

Na área de estudo predominam as altitudes superiores a 900 metros, atingindo altitudes acima de 1.600 m na sua porção leste (Figura 4). Ao norte da área encontram-se também grandes altitudes, referentes a Serra do Quebra Cangalha, com altitudes máximas em torno de 1.450 m. A dissecação do relevo se concentra nas categorias superiores a 40 metros, ou seja, nas classes de dissecação média a muito forte, com distribuição em área relativamente proporcional entre as dissecações acima de 40, acima de 60 e acima de 160 metros. As formas de topo predominantes são as do tipo convexo, seguidas das formas de topos aguçados, estas representando quase que a totalidade da área, em detrimento das formas de topo tabulares das colinas terciárias da Bacia de Taubaté, das planícies e terraços fluviais do rio Paraíba do Sul e das planícies marinhas de Ubatuba.

### **2.3 Aspectos Pedológicos**

A distribuição dos tipos de solo da área foi obtida a partir do Mapa de Solos do Estado de São Paulo, de Oliveira et al. (1999), realizado pelo Instituto Agrônomo (IAC) em conjunto com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Solos), apresentado na escala de 1:500.000. Este mapa foi gerado a partir da compilação de dados de mapeamentos pré-existentes, sendo que os documentos cartográficos utilizados para o mapeamento da porção leste do Estado de São Paulo, e portanto da região do Alto-Médio Vale do Paraíba do Sul, são provenientes do projeto RADAMBRASIL, folha SF-23/24: Rio de Janeiro/Vitória, em escala original 1:1.000.000. As informações a respeito do Mapa Pedológico do Estado de São Paulo foram publicadas na forma de Legenda Expandida, onde podem ser resgatados detalhes sobre o mapeamento realizado e a forma de compatibilização

de escalas e legendas dos diversos documentos cartográficos, necessária para a produção do mapa final.

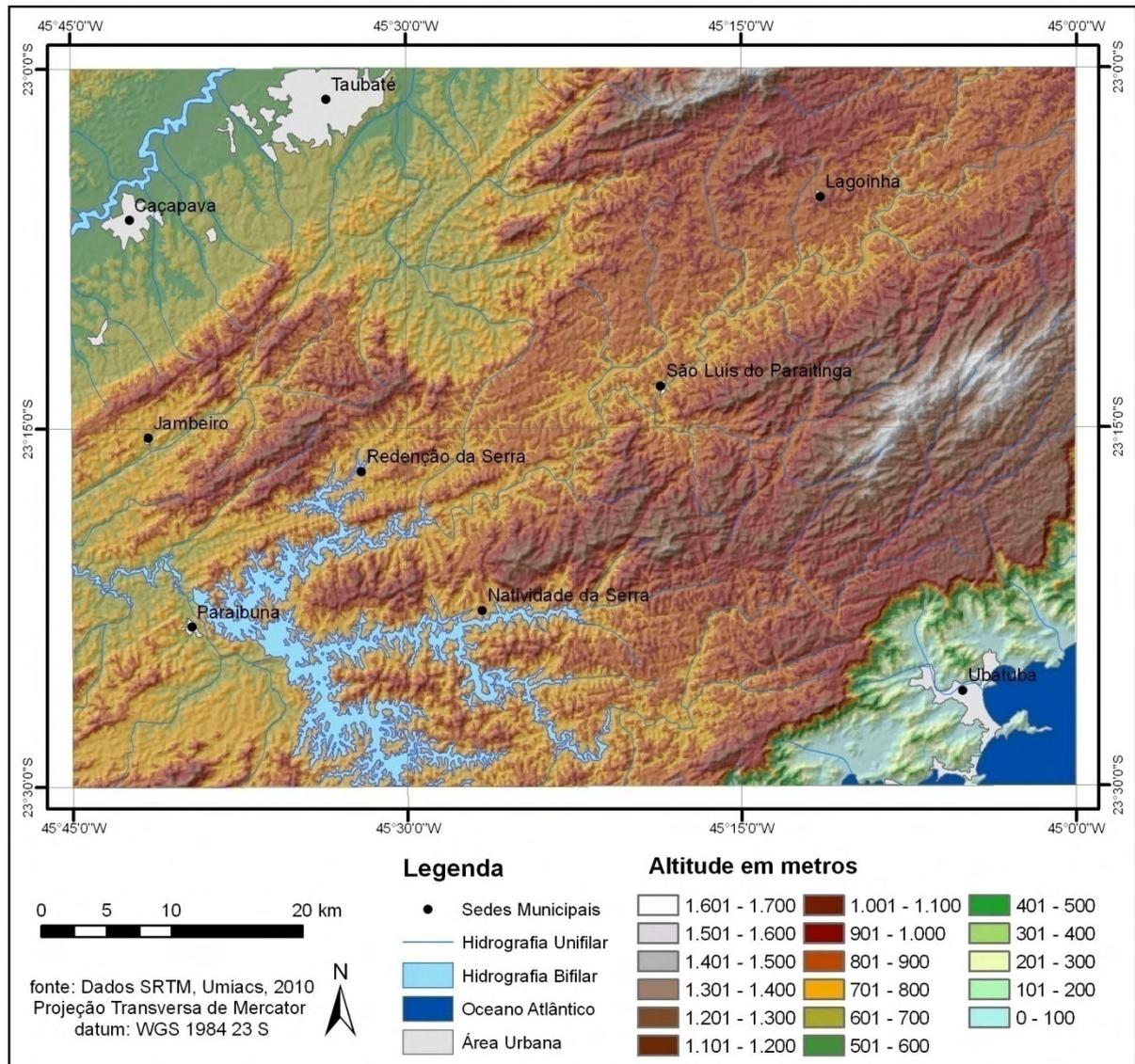


Figura 4 - Representação do mapa de classes hipsométricas da área de estudo.

As classes de solo estão representadas no mapa de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999), sendo que, na legenda do mapa, a primeira letra indica a classe no primeiro nível categórico (ordem), a segunda e terceira letras representam a classe no segundo nível (subordem), por exemplo: a sigla PVA representa os Argissolos (P) Vermelho-amarelos (VA). As legendas das unidades possuem ainda um número, diferenciando as unidades segundo suas características principais, como textura e tipo de relevo. Na

representação do Mapa Pedológico do Estado de São Paulo aqui apresentada está presente apenas a porção do mapa correspondente à área de estudo, porém a numeração do mapa original foi mantida permitindo a correlação com a legenda do mapa original (Figura 5).

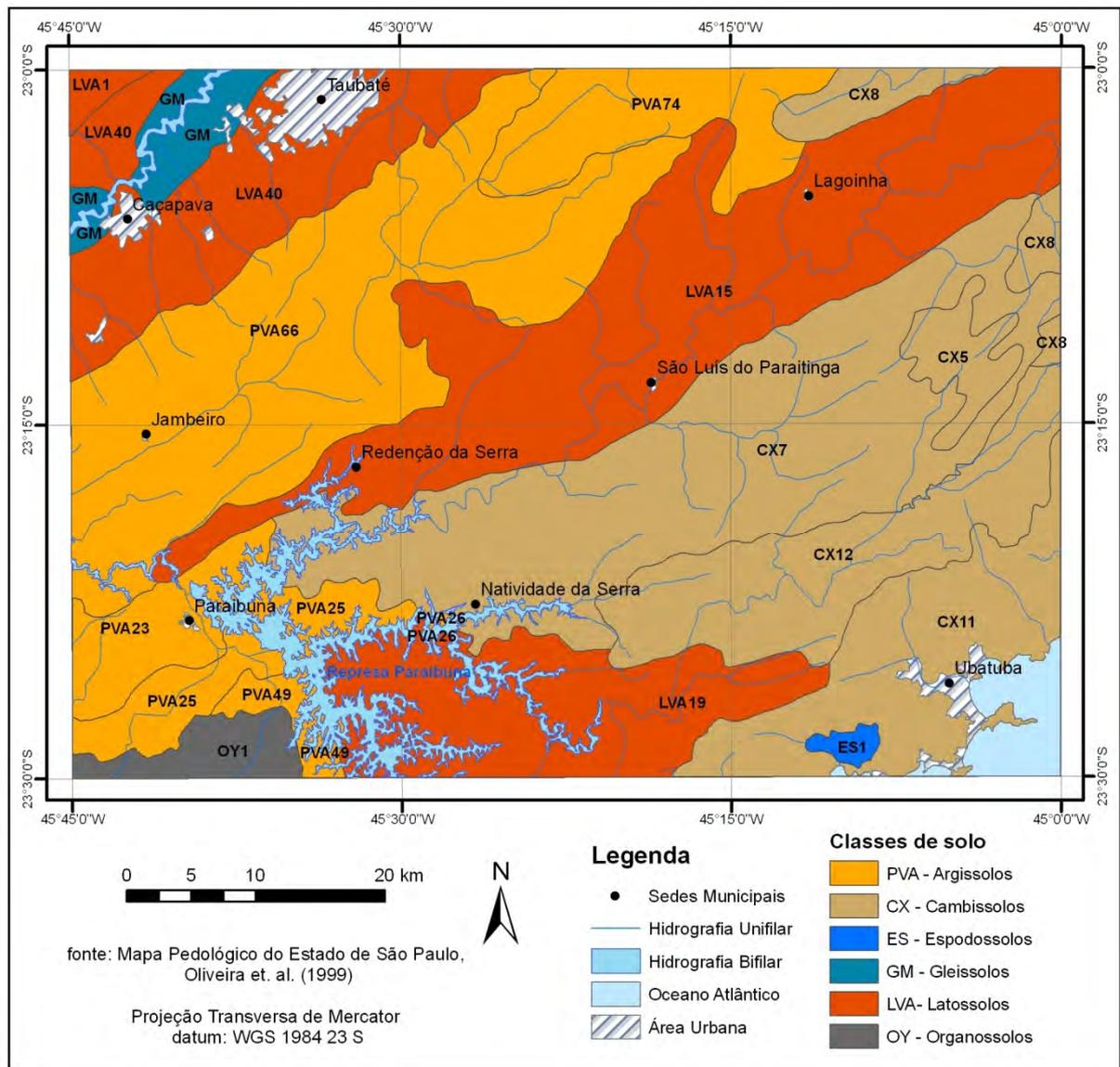


Figura 5 - Representação do mapa pedológico da área de estudo.

Estão presentes na área de estudo as classes: argissolo, cambissolo, espodossolo, gleissolo, latossolo e organossolo, com maior predominância em área dos cambissolos háplicos, seguido dos argissolos vermelho-amarelos e latossolos vermelho-amarelos. Os espodossolos são pouco representativos na área de estudo, assim como os organossolos, presentes em pequena proporção ao sul da área. Os

gleissolos presentes são do tipo melânico e se concentram na planície de inundação do rio Paraíba do Sul. A seguir, é apresentada a descrição completa das unidades, segundo Oliveira et al. (1999):

- **PVA23** - Argissolos Vermelhos-Amarelos distróficos A moderado textura média/argilosa e argilosa cascalhenta, fase não rochosa e rochosa, relevo montanhoso e forte ondulado.
- **PVA25** - Argissolos Vermelhos-Amarelos distróficos A moderado textura média/argilosa e argilosa, fase não rochosa e rochosa, relevo forte ondulado e ondulado.
- **PVA26** - Argissolos Vermelhos-Amarelos distróficos A moderado e A proeminente, textura média/argilosa e argilosa, relevo forte ondulado e montanhoso.
- **PVA49** - Argissolos Vermelhos-Amarelos distróficos + Latossolos Vermelhos-Amarelos distróficos, ambos A moderado, textura argilosa, relevo forte ondulado.
- **PVA66** - Argissolos Vermelhos-Amarelos distróficos + Argissolos Vermelhos eutróficos, ambos A moderado, textura média/argilosa, relevo forte ondulado e montanhoso.
- **PVA74** - Argissolos Vermelhos-Amarelos distróficos + Argissolos Vermelhos distróficos textura média/argilosa + Cambissolos Háplicos textura média e argilosa, ambos distróficos, todos A moderado, fase não rochosa e rochosa, relevo montanhoso e forte ondulado.
- **CX5** - Cambissolos Háplicos distróficos A proeminente e A moderado + Cambissolos Húmicos distróficos, ambos textura média e argilosa, fase não rochosa e rochosa, relevo montanhoso e escarpado.
- **CX7** - Cambissolos Háplicos distróficos textura média e argilosa, relevo montanhoso e forte ondulado + Latossolos Vermelhos-Amarelos distróficos textura argilosa, relevo forte ondulado, ambos A proeminente e A moderado.
- **CX8** - Cambissolos Háplicos distróficos textura argilosa e média + Latossolos Vermelhos-Amarelos distróficos textura argilosa, ambos A moderado e A proeminente, relevo forte ondulado.

- **CX11** - Cambissolos Háplicos distróficos textura argilosa e média, fase não rochosa e rochosa, relevo montanhoso e escarpado + Latossolos Vermelhos-Amarelos distróficos textura argilosa, relevo montanhoso e forte ondulado, ambos A moderado e A proeminente.
- **CX12** - Cambissolos Háplicos distróficos textura média e argilosa + Latossolos Vermelhos-Amarelos distróficos textura argilosa, ambos A moderado e A proeminente, relevo forte ondulado.
- **ES1** - Espodossolos Ferrocárbicos órticos A proeminente e A moderado, textura arenosa + Neossolos Quartzarênicos órticos distróficos A moderado, ambos relevo plano.
- **GM** - Gleissolos Melânicos distróficos Tb text. argilosa + NEOSSOLOS FLÚVICOS tb text. média + ORGANOSSOLOS Distróficos, todos relevo de várzea.
- **LVA1** - Latossolos Vermelhos-Amarelos distróficos A moderado, textura argilosa, relevo forte ondulado.
- **LVA15** - Latossolos Vermelhos-Amarelos distróficos textura argilosa + Cambissolos Háplicos distróficos, textura argilosa e média, ambos A moderado e A proeminente, relevo forte ondulado.
- **LVA19** - Latossolos Vermelhos-Amarelos distróficos textura argilosa + Cambissolos Háplicos distróficos textura argilosa e média, fase não pedregosa e pedregosa, ambos A moderado, relevo forte ondulado e montanhoso.
- **LVA40** - Latossolos Vermelhos-Amarelos distróficos relevo suave ondulado e plano + Argissolos Vermelhos-Amarelos distróficos latossólicos, relevo suave ondulado, ambos A moderado, textura argilosa.
- **OY1** - Organossolos Mésicos distróficos + Gleissolos Melânicos A proeminente + Gleissolos Háplicos, ambos distróficos, Tb, textura argilosa, todos relevo plano de várzea.

## 2.4 Aspectos Climáticos

Os tipos climáticos predominantes na área de estudo, segundo classificação de Setzer (1966) são:

Af – clima quente e úmido, sem estação seca, sendo que o mês mais seco tem mais de 60 mm de precipitação e a temperatura do mês mais frio é superior a 18°C. Este tipo climático restringe-se à baixada litorânea, atingindo o sopé da Serra do Mar, onde sofre mutação para o clima mesotérmico, devido à amenização da temperatura pela altitude.

Cwa – clima de inverno seco e verão chuvoso, cuja temperatura do mês mais frio é inferior a 18°C e a do mês mais quente ultrapassa os 22°C. O índice pluviométrico varia entre 1.100 mm e 1.700 mm anuais, decrescendo a precipitação no sentido oeste. A estação seca transcorre entre os meses de Abril e Setembro. Este tipo climático predomina na região do vale do rio Paraíba do Sul até a região de Queluz.

Cwb – clima mesotérmico de inverno seco e verão ameno, onde a temperatura média varia entre 10°C e 22°C e os totais pluviométricos anuais variam entre 1.300 mm e 1.700 mm. A área de atuação desse tipo climático ocorre nas regiões mais elevadas ao longo do vale do rio Paraíba do Sul.

Cfa – clima subtropical de altitude, úmido e sem estiagem, apresentando uma temperatura no mês mais quente superior a 22°C e a do mês mais frio, entre 3°C e 18°C. No mês mais seco as precipitações são superiores a 30 mm. A área de atuação desse clima é entre a escarpa da Serra do Mar e a planície costeira.

Cfb – clima subtropical de altitude, úmido e sem estiagem, onde a temperatura do mês mais quente não atinge os 22°C e o índice pluviométrico varia entre 1.100 mm e 1.200 mm anuais. A área de ocorrência desse tipo climático encontra-se nos pontos mais elevados da Serra do Mar e da Mantiqueira.

Conti (1975), estudando a região leste do Estado de São Paulo, constata que a gênese das chuvas na região é eminentemente frontal, no entanto o relevo é muito importante como elemento orientador da distribuição regional do fenômeno pluvial. Esse fato é demonstrado no cartograma do ano de 1964, no qual se verifica que, a distribuição das precipitações, reflete a orografia regional. Foi constatado ainda que o papel do relevo se enfraquece quando a trajetória da corrente polar é

SW-NE, por coincidir com a orientação do relevo. Em tais condições o ar frio penetra nos fundos dos vales, orientados segundo a sua trajetória, provocando instabilidade local nos vales em detrimento das cristas. O autor constata ainda que a orografia pode agir também como um atenuador do avanço de correntes perturbadoras, a exemplo da serra do Mar, agindo como obstáculo ao avanço da Frente Polar Atlântica e concentrando as chuvas no litoral.

## **CAPÍTULO III**

### **3 Fundamentação Teórica**

#### **3.1 Análise de Elementos do Meio Físico com Produtos de Sensoriamento Remoto**

A interpretação de imagens para a caracterização de elementos do meio físico, também denominada de fotointerpretação, tem como base a análise de elementos de relevo e da rede de drenagem, das formas resultantes e de suas propriedades. Esses elementos são analisados nas imagens a partir de suas características espectrais e radiométricas traduzidas pelo arranjo e variabilidade dos elementos tonais na forma de diferentes texturas.

O princípio metodológico da fotointerpretação utilizado neste trabalho parte do proposto por Guy (1966), transcrito por Rivereau (1969) para fotografias aéreas, adaptado por Soares et al. (1978) para imagens de satélite e sistematizado por Veneziani e Anjos (1982).

O método possui uma lógica e sistemática de interpretação, sendo dividido em três fases distintas:

Fotoleitura – que é o reconhecimento dos elementos de textura de interesse

na imagem;

Fotoanálise – que é o reconhecimento das leis e da complexidade de organização dos elementos de textura para a caracterização das formas de interesse;

Fotointerpretação – que é o estabelecimento das relações entre a função e o objeto e/ou suas feições, ou seja, é o estabelecimento de uma correlação entre a imagem produzida pelo sensor e o modelo do fenômeno no terreno.

A seqüência lógica de extração de dados pelo método sistemático permite que se analise na imagem as características de textura, estrutura e forma da feição, atribuindo a ela, na etapa de fotointerpretação, um significado de acordo com o objetivo da análise. Com esta interpretação busca-se identificar os materiais, os fenômenos e os processos do meio físico presentes na área estudada, alcançando após a fotointerpretação um diagnóstico do meio que pode ser utilizado para diversos fins.

### **3.1.1 Análise Textural**

O elemento textural é o elemento primário de análise nas fotointerpretações e foi definido por Guy (1966) como o menor elemento identificável na imagem, contínuo, homogêneo e passível de repetição. O elemento textural é evidenciado nas imagens pela variação de níveis de cinza, sendo comumente representado por um par de luz e sombra. A repetição dos elementos texturais gera uma densidade textural e, com a identificação de diferentes densidades de textura, torna-se possível estabelecer a ordenação dos elementos texturais e com isso definir estruturas, as quais são qualificadas em função da intensidade de organização (grau de estruturação) e da complexidade de organização (ordem de estruturação), como observado no Quadro 1.

Segundo Soares e Fiori (1976) em uma zona homóloga encontram-se características geológicas e geomorfológicas semelhantes, permitindo assim que seja feita uma correlação entre a textura de imagem e as propriedades geotécnicas dos materiais imageados.

Quadro 1 – Caracterização das propriedades texturais de imagens.

Propriedade Textural	Caracterização
Elemento de Textura	Tipo de elemento textural a ser analisado (relevo, drenagem, nível de cinza)
Densidade de Textura	Quantidade de elementos texturais por unidade de área da imagem (qualitativo).
Arranjo Textural	Distribuição dos elementos texturais no espaço, segundo um padrão de arranjo (retangular, anelar).
Grau de Estruturação	Evidência de organização espacial dos elementos texturais em função do seu arranjo.
Ordem de Estruturação	Complexidade de organização dos elementos texturais. É dado em função da sobreposição de estruturas.

### 3.1.2 Propriedades do Meio Físico

Na fase de interpretação das imagens é possível estabelecer uma correlação entre a textura na imagem e as características e propriedades geotécnicas dos materiais que são imageados, ou seja, estabelecer uma relação entre os níveis de cinza da imagem e a superfície do terreno. Desse modo é possível fazer inferências das propriedades destes alvos a partir da análise de seus arranjos tonais. Sendo assim destacam-se alguns fatores que controlam a textura e a estrutura dos elementos nas imagens, como:

Morfogenéticos – responsáveis pela modelação das formas do relevo e da drenagem. São o clima, a tectônica e a dinâmica da superfície;

Litológicos – relacionados às propriedades físico-químicas dos materiais rochosos e/ou do solo. São a erodibilidade, permeabilidade, plasticidade e a ruptibilidade;

Deformacionais – correspondem às feições expressas no relevo e na drenagem e são resultantes das deformações impostas ao material rochoso. Como foliações, acamamentos e fraturamentos.

A correlação das propriedades do meio físico com a textura da imagem está descrita em Mattos (2002), sendo de fundamental importância para este trabalho as propriedades: permeabilidade; alterabilidade; ruptibilidade e tropia, por estarem mais intimamente ligadas à percolação de água no meio rochoso.

**Permeabilidade** - a Permeabilidade relaciona-se com a capacidade de infiltração e circulação das águas das chuvas no terreno e se deve principalmente à porosidade primária (intergranular), em materiais sedimentares e à porosidade secundária (fraturas), em materiais metamorfizados ou ígneos. Segundo Reverau (1972), a informação sobre a permeabilidade das rochas é obtida em produtos de sensoriamento remoto a partir da observação da densidade da rede de drenagem, sendo que na medida em que a permeabilidade cresce a densidade decresce e o comprimento dos elementos texturais cresce, porém essa relação pode ser inversa em locais onde a dissolução prevalece sobre a erosão. Em terrenos cristalinos a permeabilidade aumenta em função do grau de fraturamento, sendo maior a permeabilidade onde há maiores densidades texturais e de drenagem.

**Alterabilidade** - a Alterabilidade do maciço é a susceptibilidade do mesmo a se alterar química e fisicamente sob a ação dos agentes intempéricos (clima, tempo, organismos). A classificação segundo a Alterabilidade versa sobre o domínio deste processo em relação à erosão, ou seja, áreas em que predomina a Alterabilidade alta há uma baixa resistência à erosão, formando um espesso manto de alteração intempérica. Em contraponto, áreas onde a Alterabilidade é baixa, predomina uma alta resistência à erosão e quase não existe material inconsolidado de cobertura para ser removido pelos agentes erosivos de transporte.

**Ruptibilidade** - a Ruptibilidade é a capacidade do material em se deformar de forma rúptil quando sofre algum esforço compressivo, distensivo ou direcional. Os materiais rúpteis aliviam tais esforços desenvolvendo falhas, juntas e outras fraturas, já os materiais dúcteis aliviam os esforços por meio do desenvolvimento de foliações e da reorganização dos minerais. Assim, as rochas com diferentes ruptibilidades se comportam de maneira distinta quando submetidas a esforços de tração e compressão, que será refletido em um maior ou menor grau de fraturamento.

**Tropia** - a Tropia é a característica da orientação das formas de relevo e drenagem. Materiais ígneos são isotrópicos por natureza, portanto não apresentam orientação das formas de relevo e drenagem. Já materiais metamórficos são anisotrópicos, devido a sua foliação / gnaissificação / xistosidade e apresentam

relevo e drenagem alinhados. A anisotropia das formas pode também ser resultado de intenso fraturamento.

### **3.1.3 Mapeamento Morfoestrutural**

O mapeamento morfoestrutural representa a distribuição em área das deformações que ocorreram em determinada região, devido ao encurtamento crustal que ocorre na fase final do cisalhamento tectônico. Portanto, esse mapa configura linhas não cotadas de contorno estrutural, indicativas de estruturas sinformes (baixo estrutural) ou antiformes (alto estrutural), herdadas tanto em rochas cristalinas como sedimentares. Tais estruturas são evidenciadas em produtos de sensoriamento remoto pelas assimetrias de relevo e drenagem e por drenagens estruturadas em formas anelares e radiais.

Deve-se ressaltar que os altos estruturais sempre desenvolvem um intenso fraturamento discreto (várias direções) e aberto, o que torna essas regiões altamente percolativas, sendo consideradas neste trabalho como zonas favoráveis à infiltração de água. Já os baixos estruturais são menos fraturados e seu fraturamento é fechado, o que favorece o armazenamento de água, sendo consideradas como zonas de concentração de água subterrânea.

Entre os trabalhos pioneiros no uso do mapeamento morfoestrutural no Brasil figuram Mattos et al. (1982), que fazem uso de mapas estruturais na identificação de possíveis trapas de hidrocarbonetos no Estado de São Paulo. Mattos et al. (1986) aplicam o mapeamento morfoestrutural na identificação de zonas favoráveis à prospecção de águas subterrâneas no Estado de Sergipe. Jiménez-Rueda et al. (1993) aplicam o mapa morfoestrutural no Estado do Rio Grande do Norte, conjugado com a análise fisiográfica, oferecendo subsídio ao planejamento ambiental.

A interpretação a respeito das deformações dúcteis são realizadas a partir da análise de anomalias da rede de drenagem, segundo critérios estabelecidos por Soares et al. (1982), como indicado na Figura 6. Sendo que as assimetrias indicam os mergulhos das camadas ou atitudes de foliação, definindo altos e baixos estruturais junto com as anelares e radiais, que representam o reflexo na superfície de camadas flexuradas, pois geralmente se estabelecem sobre estruturas dômicas

ou depressões estruturais, concordantes com o acamamento ou com o fraturamento anelar.

		ESTRUTURA DOS ELEMENTOS				INTENSIDADE DE ESTRUTURAÇÃO DOS ELEMENTOS (*)	FATOR		
		RADIAL	ANELAR	ASSIMETRIA DE DRENAGEM	ASSIMETRIA DE RELEVO		1	2	
ESTRUTURA DA FORMA	SIMPLES INCOMPLETA					MUITO FRACA FRACA MODERADA FORTE MUITO FORTE	0,2 0,4 0,6 0,8 1,0	0,25	(*) REFLETE A SEGURANÇA COM QUE A PROPRIEDADE FOI DETERMINADA.
	SIMPLES COMPLETA					MUITO FRACA FRACA MODERADA FORTE MUITO FORTE	0,2 0,4 0,6 0,8 1,0	0,50	1 FATOR DE CONFIABILIDADE
	RAMIFICADA INCOMPLETA					MUITO FRACA FRACA MODERADA FORTE MUITO FORTE	0,2 0,4 0,6 0,8 1,0	0,75	2 FATOR DE SIMILARIDADE
	RAMIFICADA COMPLETA					MUITO FRACA FRACA MODERADA FORTE MUITO FORTE	0,2 0,4 0,6 0,8 1,0	1,0	

Figura 6 - Classificação das formas anômalas de drenagem (Soares et al., 1982).

### 3.1.4 Análise de Fraturamentos

Os fraturamentos são analisados em produtos de sensoriamento remoto principalmente a partir de alinhamentos de drenagem. Soares e Fiori (1976) e Soares et al. (1982) utilizaram o termo lineação para definir feições individuais, traçáveis em imagens de satélite e fotos aéreas, de disposição retilínea ou arqueada. Tal definição foi utilizada por Veneziani e Anjos (1982) e Mattos (1986), que definiram as lineações como elementos texturais de imagem, fortemente estruturados, sempre expressos na forma de traços e associados a feições estruturais como fraturas, foliações e acamamentos.

#### 3.1.4.1 Lineamentos Estruturais

Os lineamentos estruturais representam feições penetrativas relacionadas a descontinuidades geológicas e/ou falhamentos, e são expressos comumente nas imagens por alinhamentos de relevo e drenagem. São interpretados a partir de

alinhamentos tonais de imagem ou alinhamentos de drenagem, definidos como lineamentos, que são feições lineares mapeáveis, simples ou compostas, contínuas ou descontínuas, da superfície terrestre, cujas partes estão alinhadas em um arranjo retilíneo ou suavemente curvo e que difere distintamente dos padrões e feições que lhes são adjacentes e, presumivelmente, reflete um fenômeno de subsuperfície. Os lineamentos são interpretados como lineamentos estruturais, constituindo o reflexo de falhas que atingiram camadas superficiais, ou seja, estruturas penetrativas que interceptam a superfície topográfica.

#### **3.1.4.2 Traços de Juntas**

Os traços de juntas correspondem aos elementos de drenagem retilíneos e fortemente estruturados identificáveis na imagem, que representam a interceptação da superfície do terreno pelas juntas. Loczy e Ladeira (1980) definem juntas como planos ou superfícies de fraturas que dividem as rochas e ao longo dos quais não ocorreu deslocamento das paredes rochosas paralelamente aos planos de fratura ou, se o deslocamento ocorreu, ele foi mínimo e não visível.

### **3.2 O Uso de Produtos de Sensoriamento Remoto no Estudo de Aquíferos**

Diversos trabalhos têm feito uso de produtos de sensoriamento remoto no estudo de aquíferos subterrâneos, principalmente em escalas de investigação ou de reconhecimento, ou seja, como uma primeira aproximação com as características geotécnicas da área e identificação de zonas favoráveis à prospecção de recursos hídricos.

Mattos et al. (1986) apresentam uma metodologia baseada na interpretação sistemática de dados de imagens Landsat, fotografias aéreas e imagens de radar numa análise de fraturamentos e morfoestruturas para prospecção de águas subterrâneas, em estudo realizado no Complexo Cristalino Sergipano. O estudo permitiu identificar áreas favoráveis à prospecção de água subterrânea, com a finalidade de orientar as pesquisas de exploração de água.

Valente et al. (2001) fazem um estudo do controle exercido por estruturas neotectônicas na concentração de água subterrânea, a partir de imagens TM-Landsat 5, dados aerogeofísicos (magnetometria e gamaespectrometria), bases

planimétricas e dados de poços tubulares, com a finalidade de refinar as metodologias de investigação de águas subterrâneas em rochas cristalinas fraturadas, melhorando assim a captação de tal recurso. Foram produzidos mapas temáticos de drenagem, de traços de juntas, de lineamentos estruturais, mapa morfoestrutural e mapa de poços tubulares, que posteriormente foram integrados com o uso de um SIG (Sistema de Informações Geográficas). O estudo pôde identificar a geometria das deformações mais favoráveis à concentração de água, identificando as conexões entre fraturas que permitiam maior condutividade hidráulica em direção aos baixos estruturais.

Madrucci et al. (2003) utilizaram imagens ETM+ Landsat7, dados aeromagnetométricos e folhas topográficas em estudo de aquíferos fraturados no município de Lindóia, leste do Estado de São Paulo, na identificação da favorabilidade de ocorrência de água subterrânea. O estudo resultou em uma análise comparativa da produtividade dos poços tubulares em relação à sua distância de lineamentos estruturais, traços de juntas e morfoestruturas. Dando continuidade à pesquisa, Madrucci et al. (2005) realizam um estudo de detalhe no aquífero fraturado de Lindóia, a partir de análise de fraturamentos em fotografias aéreas e aplicação de ensaios geofísicos de sondagem elétrica vertical e caminhamento elétrico, avaliando a presença de água nas estruturas mapeadas e definindo as direções preferenciais de fraturas a serem consideradas na prospecção de água subterrânea da região.

Lousada e Campos (2005) fazem uma integração de dados de sensoriamento remoto (TM-Landsat 5 e fotografias aéreas), dados de ensaio geofísico, dados litológicos e de geologia estrutural, para identificar áreas favoráveis à locação de poços tubulares em aquíferos fraturados. A área selecionada para o estudo localiza-se no Distrito Federal e faz parte do projeto Gota D'água, desenvolvido pela Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Distrito Federal (EMATER/DF), com o objetivo de prospectar água para o assentamento de trabalhadores rurais. O envolvimento com o projeto em questão permitiu a perfuração de poços e validação da metodologia aplicada, a partir da comparação da vazão dos poços com a favorabilidade à prospecção indicada pelo estudo.

Soares et al. (2007) apresentam um estudo de infiltração de água, realizado no Médio Vale do Paraíba do Sul, a partir do cruzamento de dados de Geologia, Pedologia, Geomorfologia, Precipitação e Uso da Terra. Com a atribuição de pesos

às diferentes variáveis mapeadas e combinação delas em um Sistema de Informações Geográficas (SIG) os autores obtiveram um Mapa de Potencialidade à Infiltração, onde são identificadas as áreas mais favoráveis à infiltração de água, de acordo com os critérios estabelecidos pelo estudo. Foram considerados pelo estudo dois compartimentos regionais: o compartimento nascente (nos planaltos de Paraitinga e Paraibuna), e o compartimento urbano-agrícola-industrial (na Bacia de Taubaté).

Silva e Mattos (2007) fazem uso de imagens TM- Landsat 5, cartas topográficas, dados pluviométricos e de vazão de poços para identificar zonas favoráveis à infiltração, circulação e concentração de águas subterrâneas na região do Médio Vale do Paraíba do Sul e definem critérios fotointerpretativos para o mapeamento de Unidades Geoambientais para Recursos Hídricos Subterrâneos (UGRHS). Além do mapeamento das UGRHS os autores indicam 7 (sete) zonas favoráveis à percolação de água, em virtude da convergência das evidências mapeadas.

## CAPÍTULO IV

### 4 Materiais e Método

Na presente pesquisa foram utilizados dados disponíveis gratuitamente em institutos de pesquisa, sendo de acesso livre e de ampla divulgação. A ferramenta utilizada no processamento dos dados foi o software ArcGis 9.2, a partir de licença adquirida pelo Programa de Pós-Graduação em Geociências e disponível ao uso dos alunos regulares do programa.

#### 4.1 Materiais

- Imagem Orbital ETM+ Landsat 7, órbita 218, ponto 76, de 26 de Junho de 2000, bandas 4 e 8, disponibilizada pela UMIACS ( *University of Maryland Institute for Advanced Computer Studies*) no centro de pesquisas GLCF (Global Land Cover Facility).
- Cartas Topográficas em escala 1:50.000, do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) no formato analógico e digital, folhas:
  - Taubaté (analógico) - SF.23 -Y-D-II-2
  - São Luis do Paraitinga (analógico) - SF.23 -Y-D-III-1

Lagoinha (digital) - SF.23 -Y-D-III-2

Paraibuna (digital) - SF.23 -Y-D-II-4

Natividade da Serra (digital) - SF.23 -Y-D-III-3

Ubatuba (analógico) - SF.23 -Y-D-III-4

- Dados de Vazão de Poços, fornecidos pelo DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica) do município de Taubaté - SP.
- Dados Pluviométricos, disponíveis no SIGRH (Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos) do DAEE/SP.
- Software ArcGis 9.2, *Esri-USA*, e extensão *Spacial Analyst*.
- PC, Desktop, Windows XP, Processador Core2 Duo, 2Gb de Memória Ram, Monitor LCD de 17”.

## **4.2 Método**

Para a identificação das zonas de captura e concentração de águas subterrâneas foram gerados os seguintes mapas temáticos:

- Mapa de Unidades Geoambientais
- Mapa Síntese Morfoestrutural

Com a combinação das informações contidas nos mapas temáticos foi obtido Mapa de Zonas de Captura e Concentração de Águas Subterrâneas, permitindo que sejam feitas considerações a respeito das zonas do meio físico de maior favorabilidade à percolação e à concentração de água pelo método de convergência de evidências.

### **4.2.1 Mapeamento das Unidades Geoambientais**

As unidades geoambientais são entendidas neste trabalho como representativas de uma zona onde as características do meio físico são consideradas homólogas, ou seja, as unidades geoambientais representam áreas cujas propriedades do meio físico são mais parecidas em seu interior do que em áreas adjacentes. O mapeamento das unidades geoambientais foi realizado a partir da imagem ETM+ Landsat 7 banda 4, com resolução espacial de 30 metros, observadas em escala de 1:100.000, e se iniciou com a compartimentação do meio físico em zonas homólogas, gerando um mapa de limites texturais. Esta

compartimentação foi realizada por diferenciação da densidade textural e da lei de organização interna dos elementos texturais. Após a delimitação das zonas homólogas foram definidas as propriedades geotécnicas das unidades (alterabilidade, ruptibilidade, tropia e permeabilidade), a partir dos critérios fotointerpretativos definidos para o mapeamento, resultando em Unidades Básicas de Compartimentação. Após ser realizada uma equivalência entre as UBCs foram obtidas as Unidades Geoambientais, agrupadas de acordo com as suas propriedades geotécnicas.

As propriedades geotécnicas das zonas homólogas foram interpretadas com auxílio da imagem ETM+ Landsat7, banda 8 (pancromática) em formato digital, devido à sua resolução espacial de 15 metros. A interpretação das propriedades seguiram os critérios fotointerpretativos estabelecidos por Soares et al. (1978).

#### **4.2.1.1 Densidade Textural**

Foram definidas 4 (quatro) classes de densidade textural e classificadas de acordo com os seguintes critérios:

**Muito Alta densidade textural (maD):** repetições de elementos texturais muito grande, sendo a superfície do elemento textural muito pequena;

**Alta densidade textural (aD):** repetições de elementos texturais grande, sendo a superfície do elemento textural pequena;

**Moderada densidade textural (mD):** repetições de elementos texturais moderada, sendo a superfície do elemento textural média;

**Baixa densidade textural (bD):** repetições de elementos texturais pequena, sendo a superfície do elemento textural grande;

#### **4.2.1.2 Alterabilidade**

É a propriedade que permite definir o grau de resistência à erosão do material rochoso em função de processos endógenos (estruturais) e exógenos (climáticos), identificadas pelos seguintes critérios fotointerpretativos:

**Muito Resistente à erosão (mR):** apresentam cristas alongadas, de vertentes côncavas e simétricas.

**Resistente à erosão (R):** apresentam encostas com topos levemente convexos,

vertentes retilíneas e parte inferior côncava.

**Pouco Resistente à erosão (pR):** apresentam encostas de topos convexos e porção inferior côncavas, sem a presença de vertente retilínea.

**Não Resistente à erosão (nR):** apresentam uma sucessão de formas convexas rebaixadas.

#### 4.2.1.3 Ruptibilidade

É a propriedade que se relaciona ao comportamento do material quando submetido a um esforço, podendo ser um comportamento rúptil ou dúctil. A ruptibilidade é indicada pelo grau de fraturamento de um material e a plasticidade pela ausência de fraturas. A interpretação da Ruptibilidade seguiu os critérios:

**Muito Fraturado (mF):** material altamente rúptil, com mais de 60 % de sua área com presença de traços de juntas e ausência de foliação.

**Fraturado (F):** material rúptil, com presença de traços de junta em torno de 30 a 60% de sua área e pouca presença de feições de foliação.

**Pouco Fraturado (pF):** material com comportamento entre rúptil e dúctil, apresentando traços de junta em menos de 30% de sua área, ou com grande presença de foliações.

**Não Fraturado (nF):** material de comportamento dúctil, com ausência de traços de juntas ou excesso de traços de foliações.

#### 4.2.1.4 Tropa

A tropia se refere a orientação das formas de relevo e drenagem. Formas altamente anisotrópicas podem estar relacionadas a intensos fraturamentos, traços de foliação, acamamentos, gnaissificação ou xistosidade. As categorias de tropia foram identificadas pelos seguintes critérios:

**Muito Orientado (mO):** relevo e drenagem unidirecionais, com cristas alongadas e contínuas.

**Orientado (O):** drenagem unidirecional e relevos variando em uma ou duas direções. Podem ocorrer cristas, desde que interrompidas por uma segunda direção preferencial.

**Pouco Orientado (pO):** drenagem bidirecional e relevo com ausência de cristas.

**Não Orientado ou isotrópico (nO):** relevo e/ou drenagem em 3 (três) ou mais direções.

#### **4.2.1.5 Permeabilidade**

É a propriedade dos materiais apresentarem maior ou menor facilidade de penetração e percolação de fluido. A permeabilidade em materiais cristalinos é diretamente proporcional à densidade textural e de drenagem. Em materiais sedimentares a relação entre a permeabilidade e a densidade textural e de drenagem é inversamente proporcional. A permeabilidade foi classificada a partir dos seguintes critérios:

**Muito Permeável (mP):** materiais cristalinos intensamente fraturados e densidade textural muito alta, materiais sedimentares com ausência de feições de drenagem.

**Permeável (P):** materiais cristalinos moderadamente fraturados e densidade textural alta, materiais sedimentares com presença de baixa densidade de drenagem.

**Pouco Permeável (pP):** materiais cristalinos pouco fraturados e densidade textural moderada, materiais sedimentares com presença moderada densidade de drenagem.

**Não Permeável (nP):** materiais cristalinos não fraturados e de densidade textural muito baixa, materiais sedimentares com alta densidade de drenagem.

#### **4.2.2 Mapa Morfoestrutural**

A análise morfoestrutural busca identificar as deformações rúpteis e dúcteis sofridas durante as fases de encurtamento crustal, identificando as estruturas do maciço rochoso a partir de seu reflexo em superfície. As feições rúpteis analisadas foram os Lineamentos Estruturais e as Juntas, as feições dúcteis foram os Altos Estruturais e os Baixos Estruturais.

##### **4.2.2.1 Análise das Deformações Rúpteis**

###### **4.2.2.1.1 Traços de Juntas**

As feições de traço de junta foram mapeadas em imagem ETM+ Landsat 7,

banda pan, em escala de 1:50.000. Foram traçadas apenas as juntas com comprimento entre 100 e 1000 metros, de modo a excluir a chance de serem mapeados de maneira errônea lineamentos estruturais interrompidos ou traços de foliações cataclásticas.

Após o mapeamento dos traços de junta foram geradas linhas de contorno de isovalores de densidade de traços de junta, com a ferramenta Kernel Density, da extensão Spatial Analyst, do Software ArcGis 9.2, utilizando como parâmetro de varredura o raio de 1.000 metros.

#### **4.2.2.1.2 Lineamentos Estruturais**

Os lineamentos estruturais foram traçados em imagem ETM+ Landsat 7 na escala de 1:100.000, a partir das feições lineares de drenagem e de quebras negativas de relevo. Foram considerados no mapeamento apenas os lineamentos estruturais com mais de 1,5 km de extensão.

Após traçados os lineamentos foram identificados os pontos de cruzamentos entre lineamentos estruturais. Os cruzamentos de lineamentos estruturais foram então inseridos no mapa e geradas linhas de contorno de densidade de cruzamentos de lineamentos estruturais com a ferramenta Kernel Density, utilizando como parâmetro de varredura o raio de 2.000 metros.

#### **4.2.2.2 Análise das Deformações Dúcteis**

A aplicação do método de análise das feições dúcteis se iniciou com a análise sistemática da rede de drenagem (Figura 7), e a identificação de suas feições anômalas como assimetrias, anelares, radiais e descontinuidades, seguindo os critérios expostos por Mattos (1982) que se baseiam principalmente na forma, grau e ordem de estruturação dos elementos da drenagem. Para tal análise, a rede de drenagem foi extraída de folhas topográficas 1:50.000, adensada pelas curvas de nível e posteriormente reduzida a uma escala de 1:150.000 de modo a obter uma visão de conjunto das feições de drenagem.

Sobre o mapa de assimetrias de drenagem foram traçadas as linhas de forma e as descontinuidades que interrompem as estruturas. A seguir foram destacados os altos e baixos estruturais, formando assim um mapa de linhas de forma,

representativo das direções das estruturas das rochas e, conseqüentemente, direções preferenciais de percolação de fluidos.

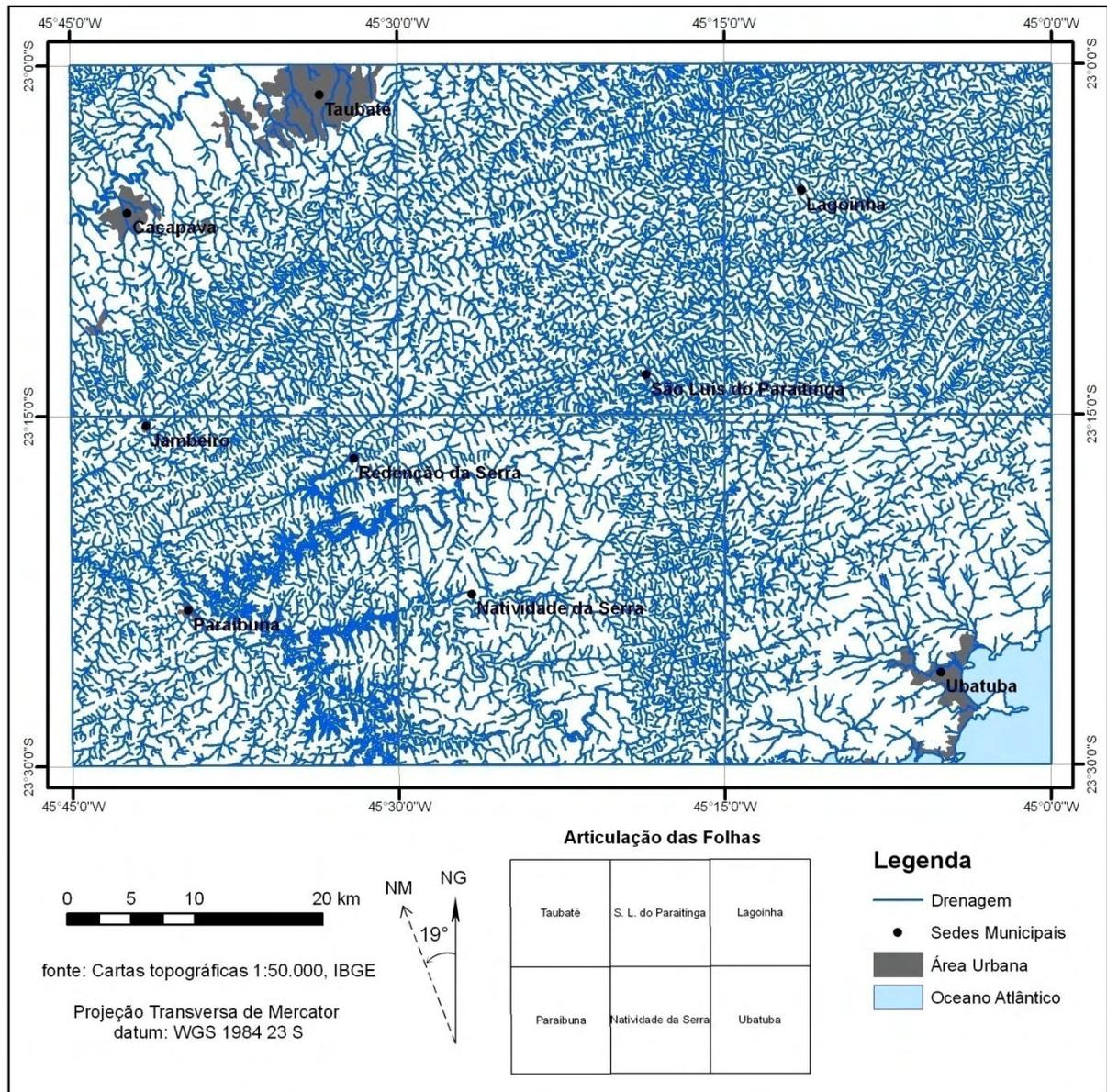


Figura 7 - Rede de drenagem da área de estudo. Fonte: topográficas IBGE 1:50.000

#### 4.2.3 Cartografia de Síntese – Mapa de Zonas de Captura e Concentração de Águas Subterrâneas

No mapa síntese foram inseridos os contornos estruturais, os altos e baixos estruturais e as discontinuidades, representando as feições dúcteis e suas interrupções, de forma a representar as direções de percolação de fluidos, bem como as zonas de recarga e concentração das águas subterrâneas. As feições

rúpteis foram inseridas na forma de zonas de variação de máximo 1 e 2, contendo a direção de variação das juntas, e na forma de isolinhas de densidade de cruzamento de lineamentos estruturais acima de 1,5 cruz/km<sup>2</sup>, ambas representando fraturamentos multidirecionais que se interceptam. As unidades geoambientais foram inseridas combinando as propriedades Permeabilidade e Alterabilidade.

Assim, para a aplicação do método da convergência de evidências, foram escolhidas as propriedades e estruturas mais favoráveis à percolação de água, combinando o Mapa de Unidades Geoambientais com o Mapa Síntese Morfoestrutural, para configurar o Mapa de Zonas de Captura e Concentração de Águas Subterrâneas.

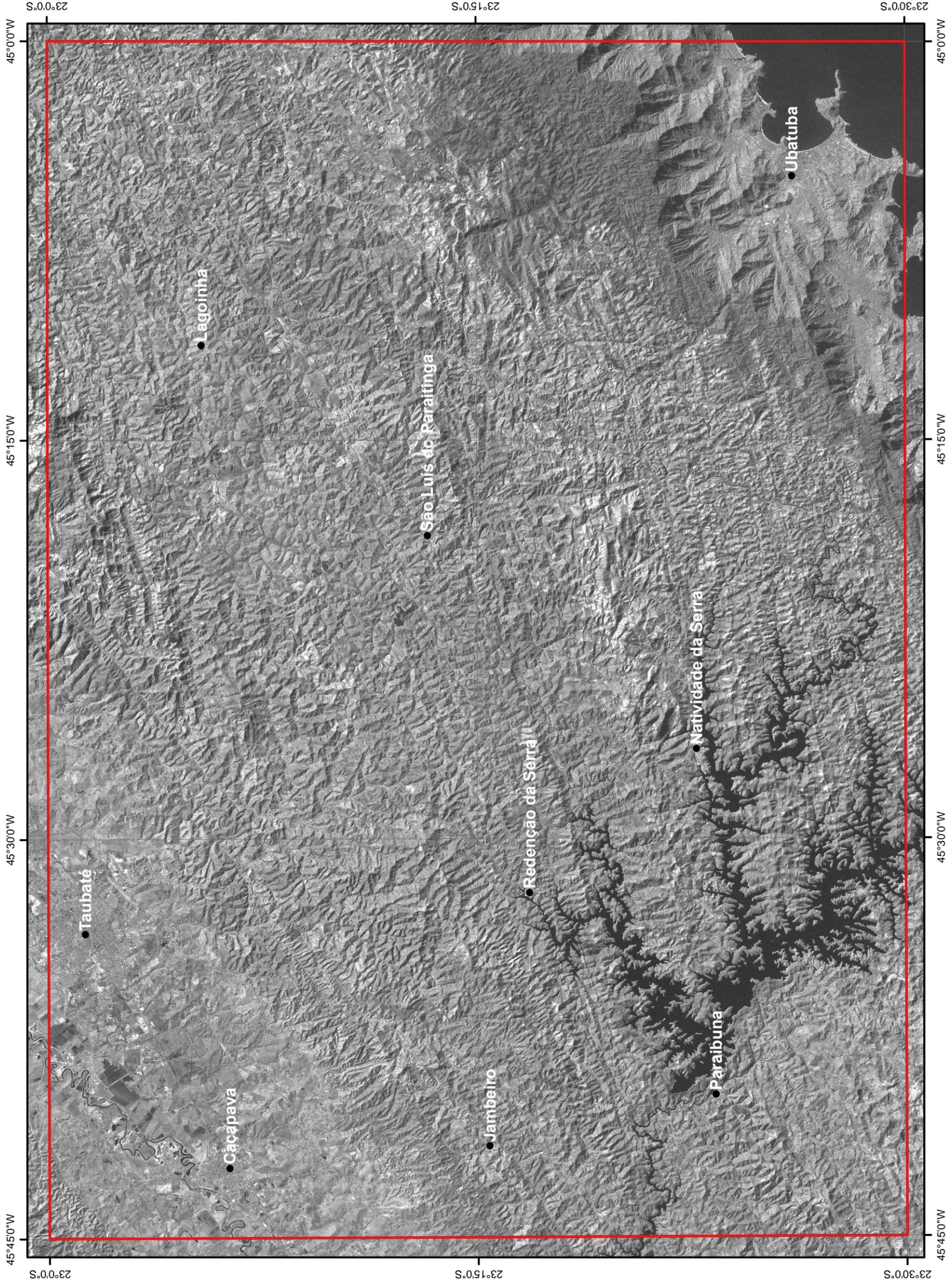
Foram inseridos também no mapa dados de vazão de poços, de modo a colaborar com a estimativa das potencialidades das áreas mapeadas como zonas de recarga e de concentração de águas subterrâneas.

#### **4.2.3 Tratamento das Imagens.**

Para a realização da interpretação das imagens orbitais, os produtos de sensoriamento remoto receberam um tratamento simplificado no software Arc Gis 9.2, com o intuito de otimizar a visualização das feições de interesse ao mapeamento sem comprometer a qualidade da imagem. Para isso foi realizado primeiramente um ajuste no georreferenciamento das imagens a partir das cartas topográficas 1: 50.000 e de pontos de GPS coletados em campo, em seguida foi feito um recorte na cena de modo a manter apenas a área de interesse ao mapeamento e então foi aplicado um contraste linear para melhorar a distribuição dos níveis de cinza.

O produto obtido, a partir dos ajustes realizados na imagem pancromática, pode ser observado na Figura 8.

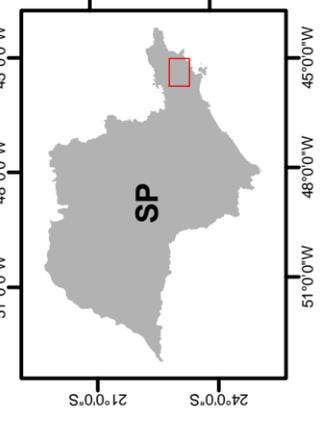
# Imagem ETM+, Landsat 7, Banda Pancromática, Órbita 220 / Ponto 076



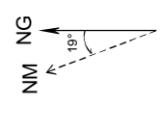
## Legenda

- Sedes Municipais
- Área de Estudo

Localização da Área de Estudo no Estado de São Paulo



Projeção Transversa de Mercator  
Datum: WGS 1984 23 S



1:250.000

Figura 8 – Imagem ETM+ Landsat 7, banda 8, referente à área de estudo

## **CAPÍTULO V**

### **5 Resultados e Discussões**

#### **5.1 Compartimentação do Meio Físico**

A Compartimentação do meio físico a partir da densidade textural resultou em 213 unidades, que após classificadas nas quatro categorias de densidade textural apresentaram: 33 unidades na categoria Muito Alta densidade textural; 82 unidades na categoria Alta densidade textural; 83 unidades na categoria Moderada densidade textural e 13 unidades na categoria Baixa densidade textural, como apresentado na Figura 9.

Nota-se uma grande concentração das unidades nas categorias alta e moderada densidade textural, em detrimento dos valores extremos (muito alta e baixa). A categoria muito alta densidade textural ficou restrita às unidades extremamente fraturadas, onde os processos erosivos deram origem a elementos texturais muito pequenos. Já a categoria muito baixa densidade textural ficou restrita aos relevos aplainados, já muito afetados pelos processos erosivos, e áreas onde os processos erosivos não foram capazes de entalhar uma quantidade significativa de

vaes encaixados. Há ainda uma tendência da ocorrência das baixas densidades texturais se concentrarem na porção NE da área de estudo, enquanto as classes de muito alta densidade textural se concentram na porção SE da área, mais próximas às escarpas da serra do Mar.

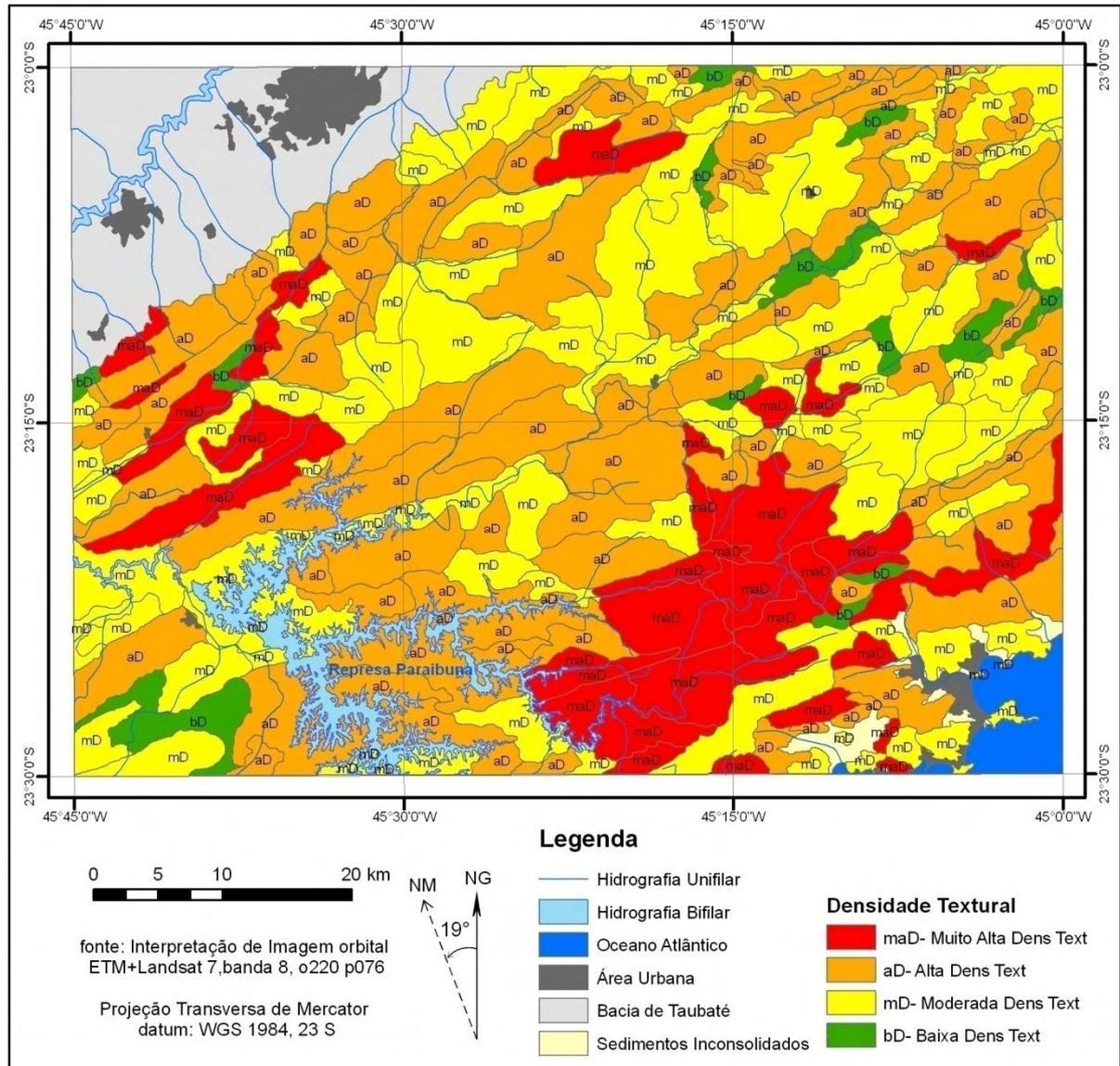


Figura 9 - Distribuição das classes de densidade textural.

É notório que as unidades tendem a se orientar na direção NE, algumas com uma forma extremamente alongada, acompanhando as principais direções de falhamentos, correspondentes aos cinturões de cisalhamento. Muitas das unidades apresentam seus contatos limitados por falhas, resultando em sucessivas unidades de limites alinhados numa mesma direção, formando assim blocos estruturais.

Ocorre na área um forte agrupamento de unidades com a mesma densidade textural, mas com tipos de textura diferentes, devido principalmente às formas de relevo e drenagem diferenciadas, evidenciando a necessidade de ser considerada a forma e o arranjo do elemento textural no momento da compartimentação do meio físico, auxiliando assim na identificação das zonas homólogas como um critério fotointerpretativo complementar à densidade textural. Caso a densidade textural fosse adotada como o único critério fotointerpretativo, na delimitação das zonas homólogas, estas unidades contíguas de igual densidade textural se agrupariam em uma única zona homóloga e o mapeamento teria um nível de detalhe menor, devido à redução no número de unidades mapeadas.

Quanto à propriedade Alterabilidade (Figura 10) também é notória a grande concentração de unidades nos valores intermediários, sendo que 16 unidades pertencem à categoria Não Resistente à erosão, 108 unidades pertencem à categoria Pouco Resistente à erosão, 80 pertencem à categoria Resistente à erosão e apenas 9 unidades se enquadraram na categoria Muito Resistente à erosão.

As unidades classificadas como pouco resistentes à erosão formam grandes agrupamentos, principalmente na porção Sul da área de estudo. Na porção Leste e Centro-Nordeste da área também estão presentes grandes agrupamentos desta categoria. As unidades classificadas como não resistentes à erosão se encontram dispersas por toda a área, são de tamanhos relativamente pequenos e não formam agrupamentos, apenas pares de unidades próximas ou contíguas. As unidades resistentes à erosão se concentram na porção NO da área de estudo, principalmente na sub-zona geomorfológica Morros Cristalinos, que constituem o entreposto entre a Bacia de Taubaté e o Planalto do Paraitinga. As unidades classificadas como Muito Resistente, são escassas e muito mal distribuídas, formando um agrupamento significativo apenas nas escarpas da serra do Mar, no extremo SE da área de estudo.

As classes de Alterabilidade Pouco Resistente e Não Resistente são de grande importância para o desenvolvimento de zonas de recarga para os aquíferos subterrâneos, sendo que a presença de material intemperizado age como um facilitador à infiltração e percolação das águas pluviais, além de reterem o fluido aquoso e o conduzirem para os níveis profundos do manto de alteração, permitindo assim que o lençol freático seja abastecido.

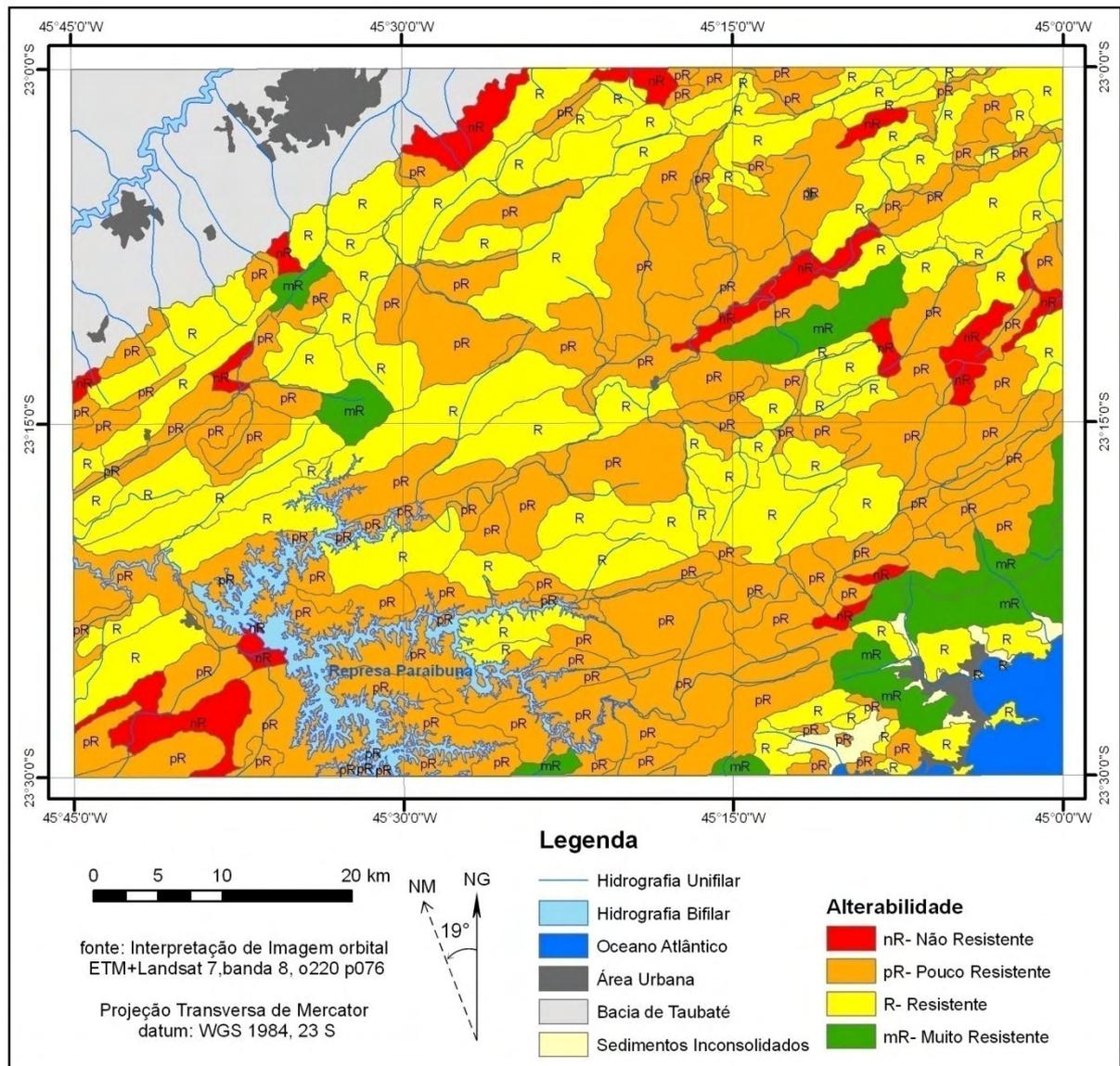


Figura 10 - Distribuição das classes de Alterabilidade

Desta forma as fraturas da rocha que não interceptam a superfície do terreno, mas atingem a base do manto de alteração, podem ser preenchidas e constantemente abastecidas com água, desde que haja um fornecimento também constante deste recurso. O manto de alteração pode agir ainda de maneira seladora, evitando a perda por evaporação da água acumulada nas zonas de concentração de água subterrânea, principalmente se o manto de intemperismo for rico em material argiloso. Por outro lado, nas zonas de recarga dos aquíferos, a presença de material argiloso e demais materiais de granulometria fina a muito fina, podem agir como

agentes seladores, preenchendo as fraturas e os interstícios dos grãos, reduzindo muito a permeabilidade secundária da rocha e a permeabilidade primária da cobertura, o que faz com que seja reduzida também a capacidade de infiltração e transmissão da água no terreno.

A propriedade Ruptibilidade (Figura 11) apresentou 44 unidades na categoria Muito Fraturado, 86 unidades na categoria Fraturado, 83 unidades na categoria Pouco Fraturado e nenhuma unidade na categoria Não Fraturado. As categorias de maior ruptibilidade se concentraram nas áreas de ocorrência das maiores densidades de traço de junta, devido ao fato de as juntas serem importantes indicadores da ruptibilidade nos critérios fotointerpretativos adotados para este estudo. O fato de nenhuma unidade se enquadrar na categoria Não Fraturado reflete o caráter eminentemente rúptil dos processos tectônicos policíclicos e polifásicos sofridos pelas rochas cristalinas presentes na área de estudo, fato também evidenciado pela grande presença de unidades correspondentes à categoria superior de ruptibilidade, ou seja, a categoria Muito Fraturado.

As unidades classificadas como muito fraturadas se apresentam na forma de grandes unidades e formam agrupamentos distribuídos por toda a área de estudo, mas principalmente na porção central da área. Estas unidades apresentam formas marcadamente alongadas na direção NE, correspondente à principal direção de alinhamento dos lineamentos estruturais. As unidades classificadas como fraturadas são extremamente abundantes e formam agrupamentos por toda a área de estudo, intercalados por agrupamentos das unidades classificadas como Pouco Fraturado, que apesar de possuírem tamanhos relativamente reduzidos também possuem abundância equivalente em número de unidades.

Tanto para a recarga de aquíferos quanto para a concentração de águas subterrâneas, a ruptibilidade do maciço é de fundamental importância, sendo responsável pela abundância de fraturas e conseqüentemente pela permeabilidade secundária. Portanto, o mapeamento desta propriedade é um indicador da capacidade de captação, de transmissão e de concentração das águas subterrâneas, sendo tais capacidades diretamente proporcionais à ruptibilidade.

Porém, a ruptibilidade por si só não é um determinante da permeabilidade do maciço, havendo a necessidade de que as fraturas sejam abertas, não estejam preenchidas, que sejam fraturas de direções variadas e que se cruzem, de forma a permitir a transmissão do fluido. Assim, a ruptibilidade do maciço é uma propriedade

de extrema importância para a identificação das zonas de captação e concentração de águas subterrâneas mas não é conclusiva, sendo que até a rugosidade das paredes das fraturas é um fator importante na transmissividade de um aquífero fraturado.

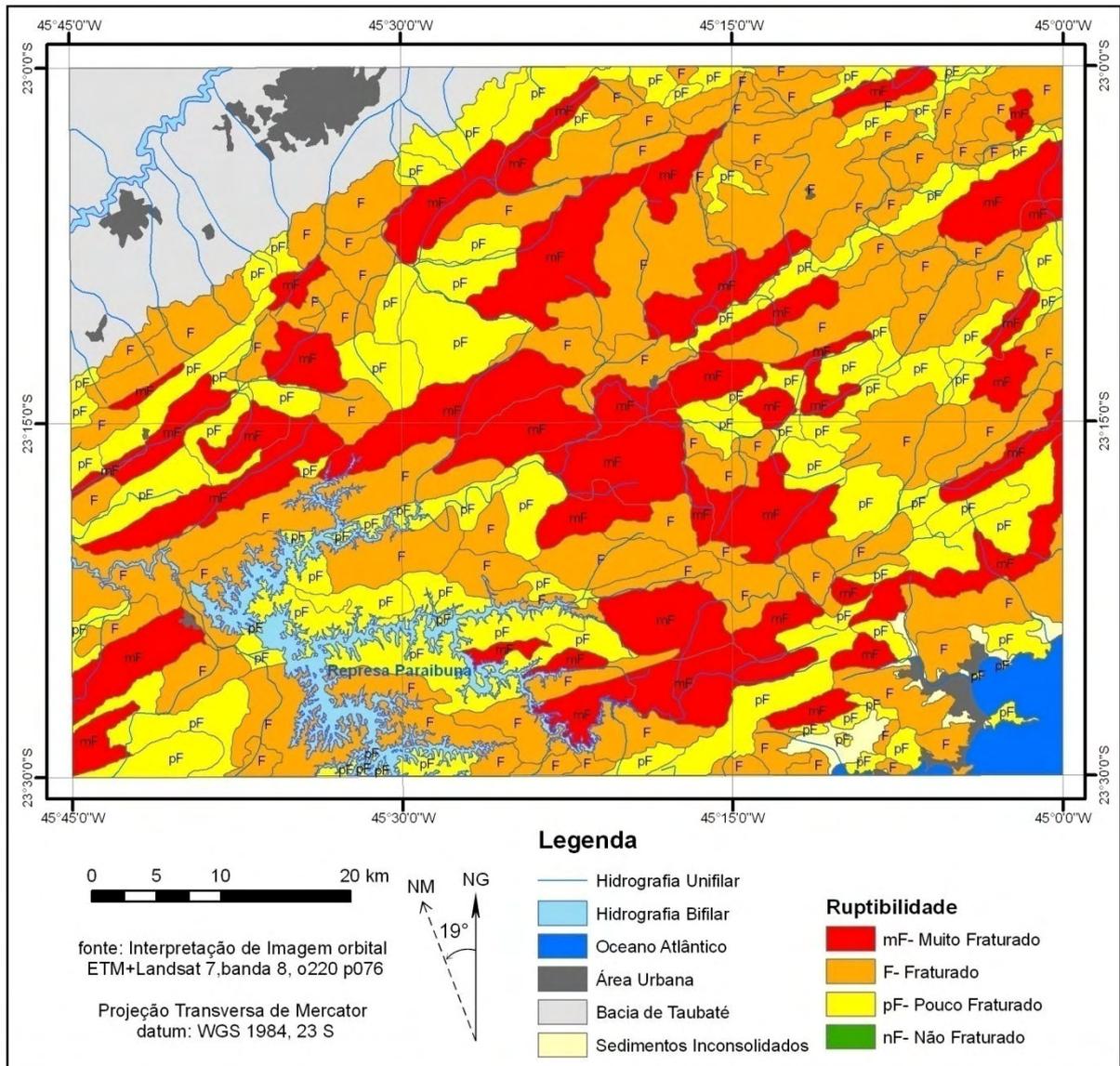


Figura 11 - Distribuição das classes de Ruptibilidade.

O mapeamento da propriedade Tropa (Figura 12) apresentou 16 unidades na categoria Muito Orientado, 40 unidades na categoria Orientado, 90 unidades na categoria Pouco Orientado e 67 unidades na categoria Não Orientado.

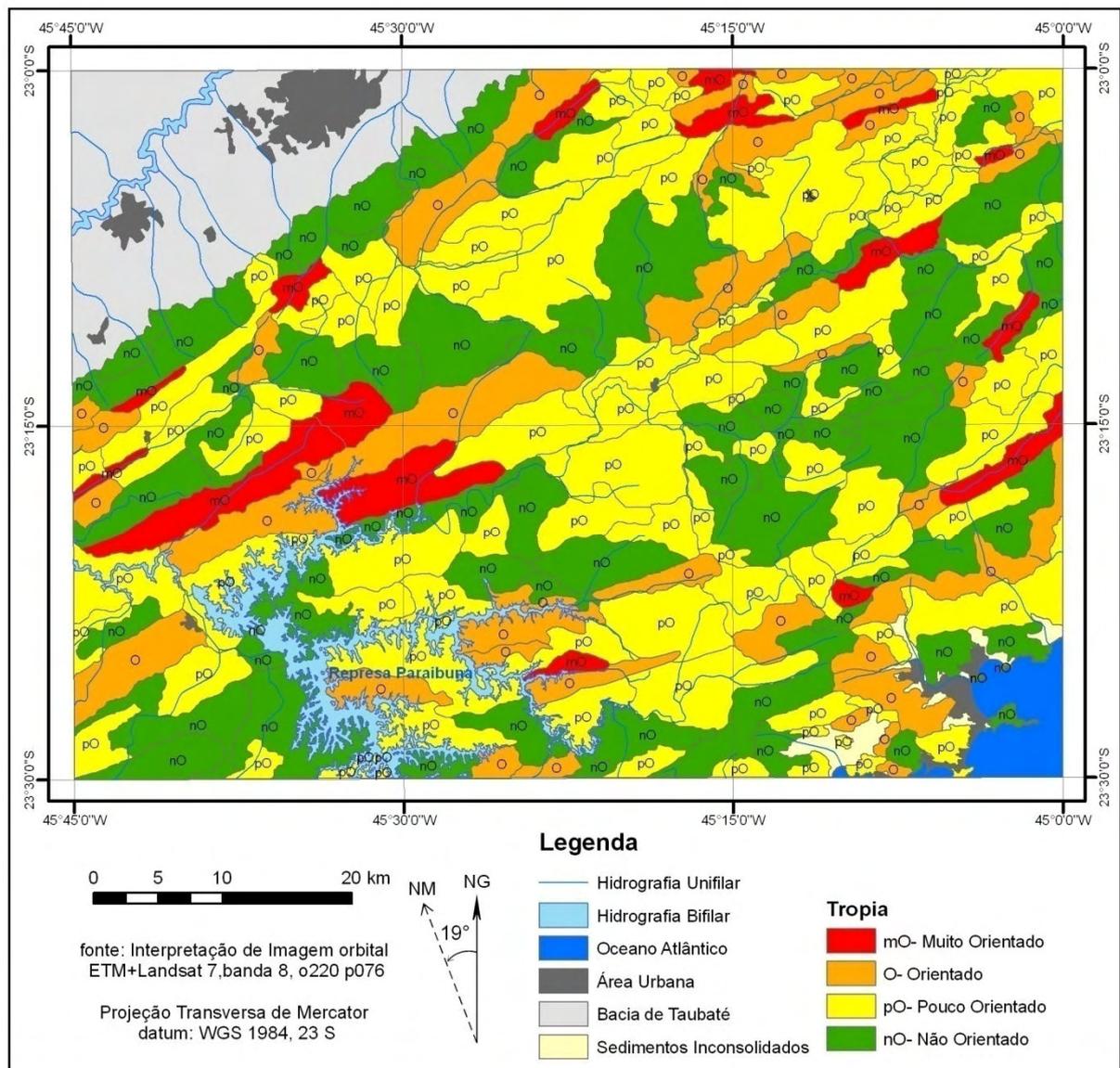


Figura 12 - Distribuição das classes de tropia.

. A grande concentração de unidades nas categorias Pouco Orientado e Não Orientado se deve ao intenso fraturamento das rochas presentes na área de estudo, influenciado por eventos tectônicos policíclicos e polifásicos, que geraram fraturas em abundância e em diversas direções. Assim, é incomum serem encontradas unidades onde há apenas uma direção preferencial de orientação de relevo e drenagem. Assim, das 16 unidades classificadas como Muito Orientado, 9 delas foram classificadas como muito fraturadas, 6 delas foram classificadas como fraturadas e apenas 1 unidade foi classificada como pouco fraturada. Isso porque as fraturas unidirecionais se apresentam na forma de feixes, formando sistemas de fraturas e famílias de juntas de grande densidade, se relacionando principalmente a

rochas e processos deformacionais rúpteis, enquanto em rochas dúcteis as feições lineares mais representativas são as foliações. Diversas unidades classificadas como muito fraturadas no entanto foram classificadas como Não Orientado ou Pouco Orientado, isso porque, apesar de tais fraturas serem abundantes, elas estão dispostas em diversas direções, o que pode estar representando, por exemplo, juntas discretas ou zonas de cruzamento de diferentes famílias de juntas, resultando em corpos rochosos não orientados apesar da abundância de fraturas.

As unidades classificadas como muito orientadas são de tamanho relativamente pequeno e possuem um alongamento na direção NE. Estão distribuídas de forma espaçada pela área de estudo, apresentando pequena concentração nos extremos Leste e Oeste. A classe Orientado apresenta unidades de tamanho um pouco maior que as da classe Muito Orientada, também alongadas em direção NE e bem distribuídas pela área de estudo, formando poucos agrupamentos, que estão presentes principalmente na porção NE e SE da área. A categoria pouco orientada é a mais abundante, com unidades de tamanho razoavelmente grande, levemente alongadas e que formam grandes agrupamentos, principalmente nas porções norte, NE e central da área de estudo. As unidades não orientadas também são de tamanho grande e apesar de poucas estarem alongadas os seus agrupamentos tendem a se alinhar na direção preferencial NE, principalmente na porção NO da área de estudo, representada pelos morros cristalinos que margeiam a bacia de Taubaté e na porção SE, próximo às escarpas da serra do Mar.

A avaliação da tropia dos materiais é importante no estudo de aquíferos subterrâneos porque os maciços anisotrópicos, ou seja, com orientação bem definida, podem formar corredores de escoamento de água subterrânea, na forma de uma percolação dirigida e acelerada, ocupando os planos de descontinuidade, sendo boas zonas de circulação de águas subterrâneas. Por outro lado, nos maciços pouco orientados a diversidade de direção de fraturas pode colaborar com a interconectividade das fraturas e também com a vazão, constituindo bons reservatórios.

O mapeamento da propriedade Permeabilidade apresentou 13 unidades na categoria Não Permeável, 84 unidades na categoria Pouco Permeável, 83 unidades na categoria Não Permeável e 33 unidades na categoria Muito Permeável (Figura

13). Como este estudo trata de terrenos desenvolvidos em rocha cristalina, a permeabilidade será resultado do fraturamento do maciço e da densidade textural apresentada, ocorrendo uma relação diretamente proporcional entre a permeabilidade e a densidade textural, o que resulta na distribuição equivalente destas classes. A permeabilidade não apresenta relação diretamente proporcional com a ruptibilidade porque, apesar da permeabilidade do maciço aumentar com a ruptibilidade, a presença de traços de foliação aumenta a permeabilidade, porém indica uma redução na ruptibilidade do material.

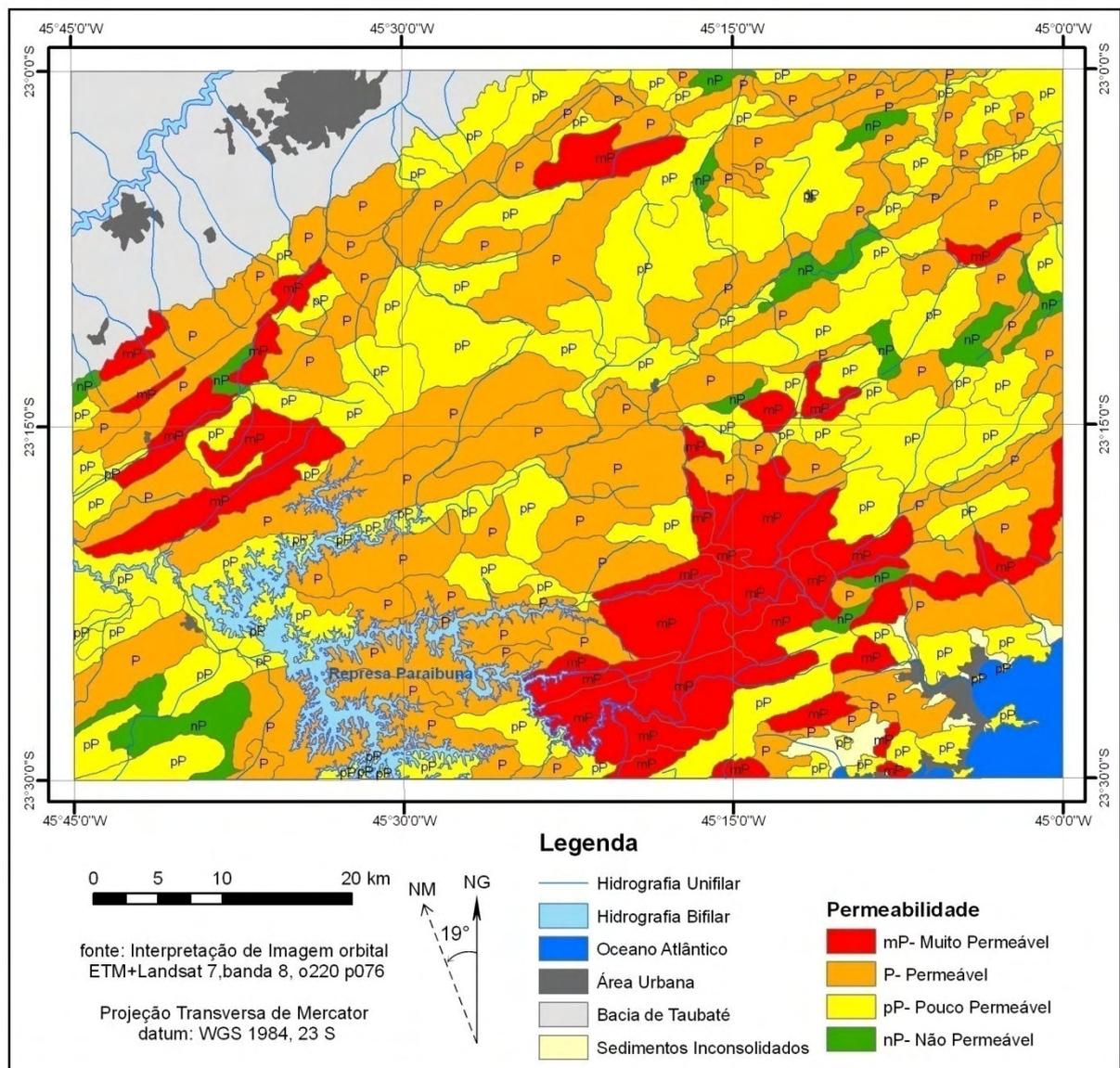


Figura 13 - Distribuição das classes de Permeabilidade.

As unidades classificadas como muito permeáveis se mostram mal distribuídas pela área de estudo, com uma relevante concentração na porção NO da área e principalmente na forma de um grande agrupamento na porção centro-NE, com 15 unidades contíguas e 7 unidades próximas, de distribuição periférica. Essa grande concentração de unidades na categoria muito permeável chama muito a atenção neste estudo, porque pode representar uma importante zona de recarga e concentração de águas subterrâneas. As unidades classificadas na categoria Permeável também formam grandes agrupamentos, porém mais bem distribuídos, estando concentrados principalmente na porção centro-leste da área de estudo. As unidades classificadas como pouco permeáveis possuem a mesma abundância das classificadas como permeáveis, porém possuem tamanhos menores, formam agrupamentos menos densos e se concentram principalmente na porção leste da área de estudo. As unidades não permeáveis também possuem um tamanho bem reduzido, não formam agrupamentos e estão quase que totalmente concentradas na porção leste da área, com 3 ocorrências na porção oeste.

É evidente que a propriedade permeabilidade é de fundamental importância para este estudo, tendo em vista que em função da permeabilidade os materiais serão mais ou menos competentes na captação e transmissão do recurso hídrico e outros fluidos. Assim, as unidades classificadas como muito permeáveis possuem grande chance de serem boas zonas de recarga de aquíferos, e também são zonas muito suscetíveis à ação de agentes poluidores. Os grandes agrupamentos de unidades muito permeáveis aumentam muito as chances de estas unidades apresentarem as características necessárias para serem boas captadoras e condutoras de água, ou seja, aumentam as chances de ocorrerem fraturas abertas, que se cruzem e não estejam preenchidas, devido a sua maior representatividade em área. O agrupamentos das unidades aumenta ainda a sua capacidade de evitar o escoamento superficial do fluxo aquoso, em detrimento das unidades muito permeáveis porém pequenas e esparsas. O mesmo vale para as unidades classificadas como permeáveis, que quando agrupadas podem ser boas captadoras de água, apesar de serem relativamente menos permeáveis.

Optou-se por sintetizar a classificação das Unidades Geoambientais a partir das propriedades mais relevantes à infiltração de água subterrânea: a Permeabilidade e a Alterabilidade, tendo em vista que as informações a respeito da

propriedade Ruptibilidade estão de certa forma contidas na Permeabilidade e que a propriedade Tropicidade se refere mais à velocidade de percolação do que à capacidade de captação de água. A escolha da Permeabilidade foi devido a sua relação direta com a capacidade do material rochoso em permitir a infiltração e percolação da água, além da relação desta propriedade com o grau de fraturamento do terreno e com a densidade textural, agindo como uma síntese destas propriedades. A escolha da Alterabilidade se deve ao fato de os materiais menos resistentes ao intemperismo desenvolverem mantos profundos de alteração intempérica, apresentarem relevos rebaixados, menor declividade, topos convexos e vales mais amplos, sendo de grande importância à infiltração das águas pluviais.

A classificação das unidades se deu em função do maior valor de Permeabilidade seguido do maior valor em Alterabilidade, resultando no Mapa de Unidades Geoambientais (Figura 14).

No mapa de Unidades Geoambientais é possível observar de forma mais detalhada a distribuição qualitativa das propriedades geotécnicas dos materiais, podendo ser estimada a capacidade de infiltração e de percolação de água. Das 12 categorias formadas pela combinação das propriedades Permeabilidade e Alterabilidade, as 6 primeiras são de grande importância à recarga dos aquíferos e formam grandes agrupamentos. A distribuição das unidades nestas 6 classes principais se deu da seguinte forma:

mP, pR- 18 unidades

mP, R- 11 unidades

mP, mR- 4 unidades

P, pR- 33 unidades

P, R- 47 unidades

P, mR- 3 unidades

Nota-se que nas classes de maior permeabilidade não houve correlação com a classe Não Resistente à erosão, estas ficaram relacionadas apenas às classes Pouco Permeável e Não Permeável. Porém os materiais pouco resistentes à erosão facilitam a percolação, tornando estas unidades relativamente mais permeáveis que as de mesma classe de permeabilidade. Assim, esta classificação não deve ser

interpretada de forma arbitrária, devendo ser levada em consideração a combinação das propriedades e ponderado qual das propriedades é de maior relevância para a situação a que se está analisando. As propriedades Tropicidade e Ruptibilidade também são de grande importância e não devem ser descartadas nas interpretações das Unidades Geoambientais.

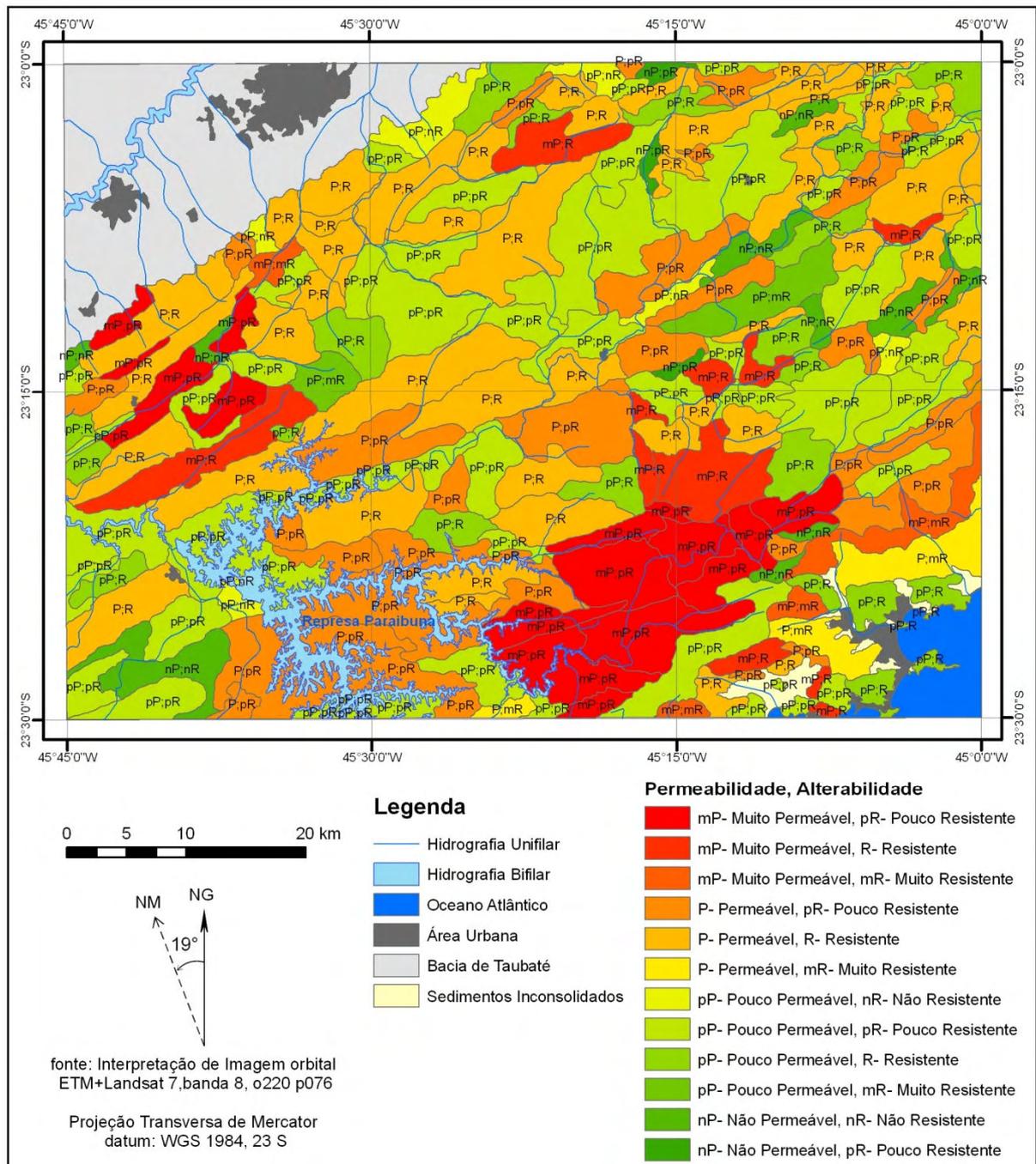


Figura 14 - Representação do Mapa de Unidades Geoambientais.

## **5.2 Mapeamento Morfoestrutural**

Nos estudos de aquíferos subterrâneos, além das condições de superfície do terreno, é extremamente relevante considerar a dinâmica sub-superficial, para que se possa fazer considerações a respeito da percolatividade do maciço rochoso e das direções dos fluxos. Os mapeamentos morfoestruturais são de grande importância neste aspecto, permitindo que informações muito relevantes sejam obtidas.

O mapeamento morfoestrutural realizado neste trabalho apresenta as feições dúcteis e rúpteis do maciço, sendo que as deformações dúcteis foram mapeadas como linhas de forma, representando o contorno estrutural, que indica principalmente da atitude de foliação, acamamento ou xistosidade das rochas, sendo consideradas ainda as discontinuidades que interrompem os contornos estruturais. Já as feições rúpteis mapeadas foram as juntas e os lineamentos estruturais.

### **5.2.1 Deformações Dúcteis**

#### **5.2.1.1 Contornos Estruturais**

As deformações dúcteis mapeadas e suas discontinuidades estão apresentadas no Mapa de Contorno Estrutural (Figura 15).

Foram identificados pelo mapeamento 12 baixos estruturais e 10 altos estruturais, mostrando que há uma distribuição quantitativamente equilibrada entre eles. Porém, esta equidistribuição não ocorre em área, ou seja, a maior concentração de baixos estruturais se dá na porção oeste da área de estudo, enquanto os altos estruturais estão localizados, em sua maioria, na porção central e leste da área. Os baixos estruturais mapeados são amplos, com eixos de maior largura variando em torno de 10 e 20 quilômetros, atingindo o máximo de 30 quilômetros, num baixo extremamente alongado em direção NE no município de Lagoinha. Em relação às formas dos baixos estruturais, é muito freqüente na área a ocorrência de baixos alongados na direção NE, e também é muito freqüente os baixos em formato circular a levemente ovalado.

Quanto aos altos estruturais, muitos deles se encontram confinados, ou “apertados” entre os baixos estruturais, ocorrendo na área uma maior presença de

altos estreitos, com menos de 10 quilômetros de extensão em seu eixo maior. Porém ocorre um alto estrutural muito amplo entre os municípios de São Luis do Paraitinga e Ubatuba, com cerca de 30 quilômetros em seu eixo maior e 20 quilômetros em seu eixo menor, alongado na direção NE. As formas dos altos estruturais variam muito, apresentando pontas alongadas e encaixadas entre os baixos estruturais, como pode ser observado no alto que se encontra a NNO de São Luis do Paraitinga, que apresenta uma feição quase que triangular, estando encaixado entre 3 baixos estruturais.

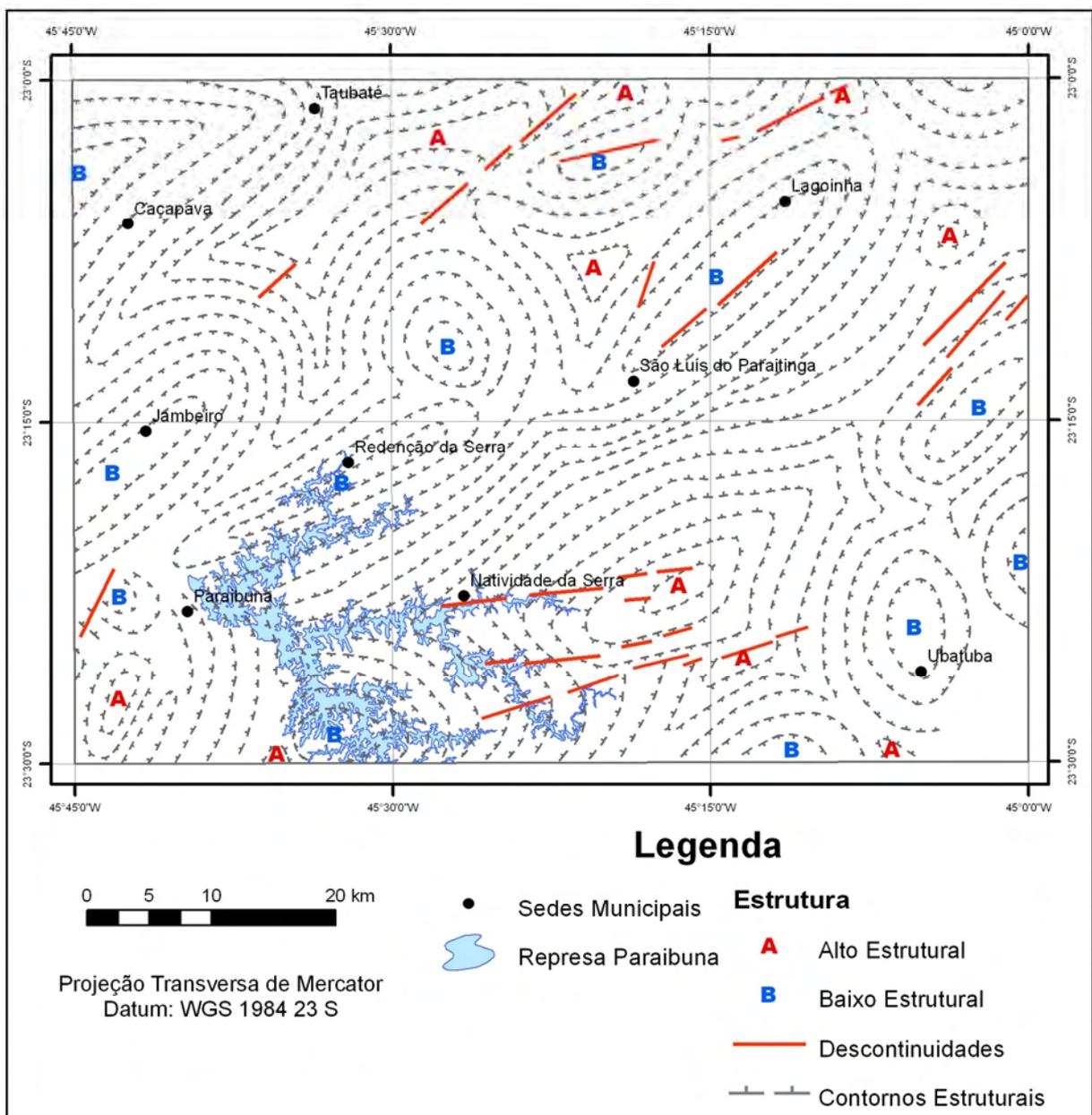


Figura 15 - Representação do Mapa de Contorno Estrutural.

Os baixos estruturais se apresentam na forma de grandes alinhamentos, principalmente nas direções NO e NE, enquanto os altos estruturais apresentam-se alinhados apenas na região de Ubatuba, na direção NO e ao leste de Taubaté, praticamente na direção Leste-oeste. O alinhamento de altos estruturais de Ubatuba atinge cerca de 30 quilômetros, enquanto o alinhamento de baixos estruturais de Paraibuna a Lagoinha atinge 70 quilômetros de extensão.

As descontinuidades encontram-se mal distribuídas em área, estando presentes nos extremos sul e leste e no centro-norte da área de estudo. As principais descontinuidades estão alinhadas segundo as direções dos cinturões de cisalhamento, variando principalmente entre as direções N30E e N80E. A sua concentração mais representativa está no grande alto estrutural entre São Luis do Paraitinga e Ubatuba, na porção Leste da área de estudo, acompanhando a direção do eixo maior deste alto estrutural. Tais descontinuidades são resultado dos falhamentos transcorrentes dextrais da zona de cisalhamento presente nesta porção da área, responsável pelos contatos entre litologias e blocos estruturais.

Esta distribuição de altos estruturais apertados e baixos estruturais amplos é típica de níveis crustais profundos, podendo ser indicativo de que a região sofreu forte processo erosivo, a ponto de atingir tal nível crustal. Assim, espera-se uma combinação de feições dúcteis com as feições rúpteis, levando em consideração as condições plásticas encontradas nos níveis profundos da crosta. Tal fato pode ser observado também pela grande presença de rochas com foliação cataclástica, cujas atitudes das foliações seguem a direção indicada pelos altos e baixos estruturais, condicionando assim os fluxos de sub-superfície.

Os fluxos se direcionam, em sub-superfície, dos altos para os baixos estruturais, dessa forma os altos estruturais constituem importantes zonas de recarga de aquíferos e os baixos estruturais constituem as zonas de acumulação de água (Figura 16).

As descontinuidades também exercem um papel muito importante na dinâmica dos fluidos que venham a percolar entre as estruturas dômicas, pois as descontinuidades podem agir como estruturas seladoras ou podem agir como uma abertura para a fuga de água. Tais comportamentos variam de acordo com a geometria da descontinuidade e sua inclinação em relação à estrutura dômica, havendo necessidade de avaliação em campo das direções de mergulho das

descontinuidades para averiguar se elas possuem potencial para serem seladoras da estrutura ou para serem condutos de fuga de recurso hídrico.

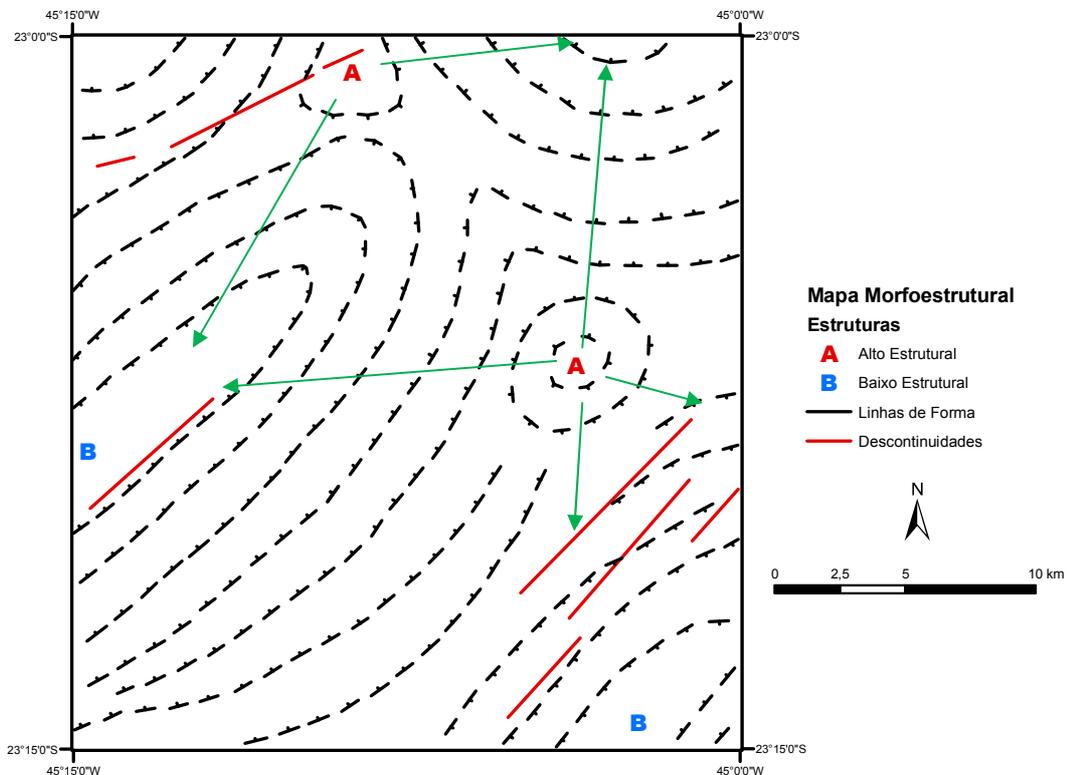


Figura 16 - Contorno Morfoestrutural de parte da área de estudo (folha Lagoinha), as setas verdes indicam as direções dos fluxos.

### 5.2.2 Deformações Rúpteis

As deformações rúpteis são de grande relevância para os estudos de aquíferos, principalmente devido à permeabilidade secundária gerada pelas fraturas. Estas fraturas constituem condutos para que a água possa infiltrar, circular e acumular no interior de rochas, principalmente das rochas com baixa porosidade primária, ou intergranular. Neste sentido, deve-se levar em consideração que a maior permeabilidade secundária será em função da maior presença de fraturas, maior abertura entre tais fraturas e principalmente da interconectividade destas fraturas. Assim, além das fraturas serem abundantes é essencial que elas estejam abertas e se cruzem, formando uma rede de fraturas, que se apresentam na forma de séries e sistemas de fraturas abertas e não preenchidas.

Neste estudo, as fraturas mapeadas a partir de alinhamentos de canais de drenagem e relevo foram divididas entre lineamentos estruturais e traços de junta, em função do tamanho e forma de tais alinhamentos.

### **5.2.2.1 Lineamentos Estruturais**

O mapeamento de lineamentos estruturais (Figura 17) apresentou 1562 lineamentos, que variam entre uma extensão máxima de 12 km de comprimento e um tamanho mínimo de 680 m. Estes lineamentos de tamanho reduzido representam na verdade partes de lineamentos de extensão maior que 1,5 km, porém interrompidos em porções descontínuas e menores, respondendo aos critérios fotointerpretativos estabelecidos para este trabalho, de serem considerados apenas lineamentos estruturais acima de 1,5 km de extensão. A média do comprimento dos lineamentos mapeados neste trabalho é de 3.763 m com desvio padrão de 1.750 m.

A direção preferencial dos lineamentos estruturais é claramente a direção dos cinturões de cisalhamento, em torno de N60E e N70E, em faixas onde há grande concentração de lineamentos de espaçamento muito pequeno, na ordem de centenas de metros. Ocorre ainda com bastante frequência lineamentos nas direções N40W e N70W, estes ocorrendo de maneira mais bem distribuída pela área de estudo. Na porção NE da área é abundante também a direção Leste-oeste, porém com presença bem menor e muito mais espaçados que os lineamentos das direções anteriormente citadas.

A presença de lineamentos estruturais é muito importante na permeabilidade secundária do maciço rochoso, porém é de suma importância que estes lineamentos se cruzem, permitindo uma melhor percolação do fluido aquoso. Para resgatar a informação a respeito da distribuição em área do cruzamento dos lineamentos estruturais pode ser observado o mapa de Densidade de Cruzamento de Lineamentos Estruturais, na Figura 18.

O mapeamento da Densidade de Cruzamento de Lineamentos Estruturais evidenciou as zonas de maior densidade de cruzamento dos lineamentos, bem como zonas de baixíssima densidade de cruzamentos, sendo que a maior densidade encontrada foi de 3,99 cruzamentos/km<sup>2</sup> e a densidade média foi de 0,56

cruz/km<sup>2</sup>. As zonas de maior densidade de cruzamento de lineamentos estruturais estão localizadas na porção NE da área de estudo, no município de Lagoinha, na porção central da área de estudo, à leste de São Luis do Paraitinga e na porção Oeste da área de estudo, no município de Jambeiro.

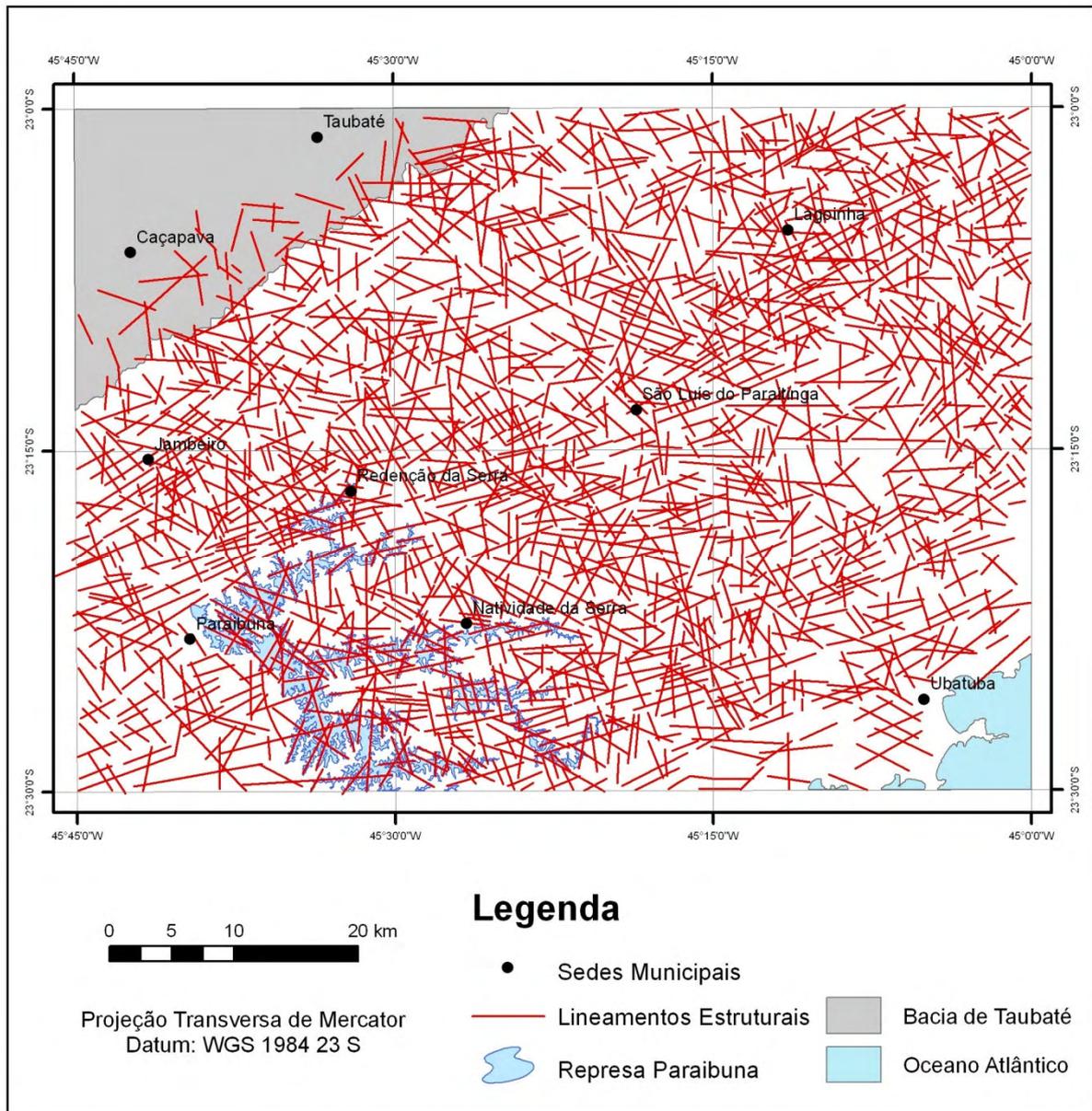
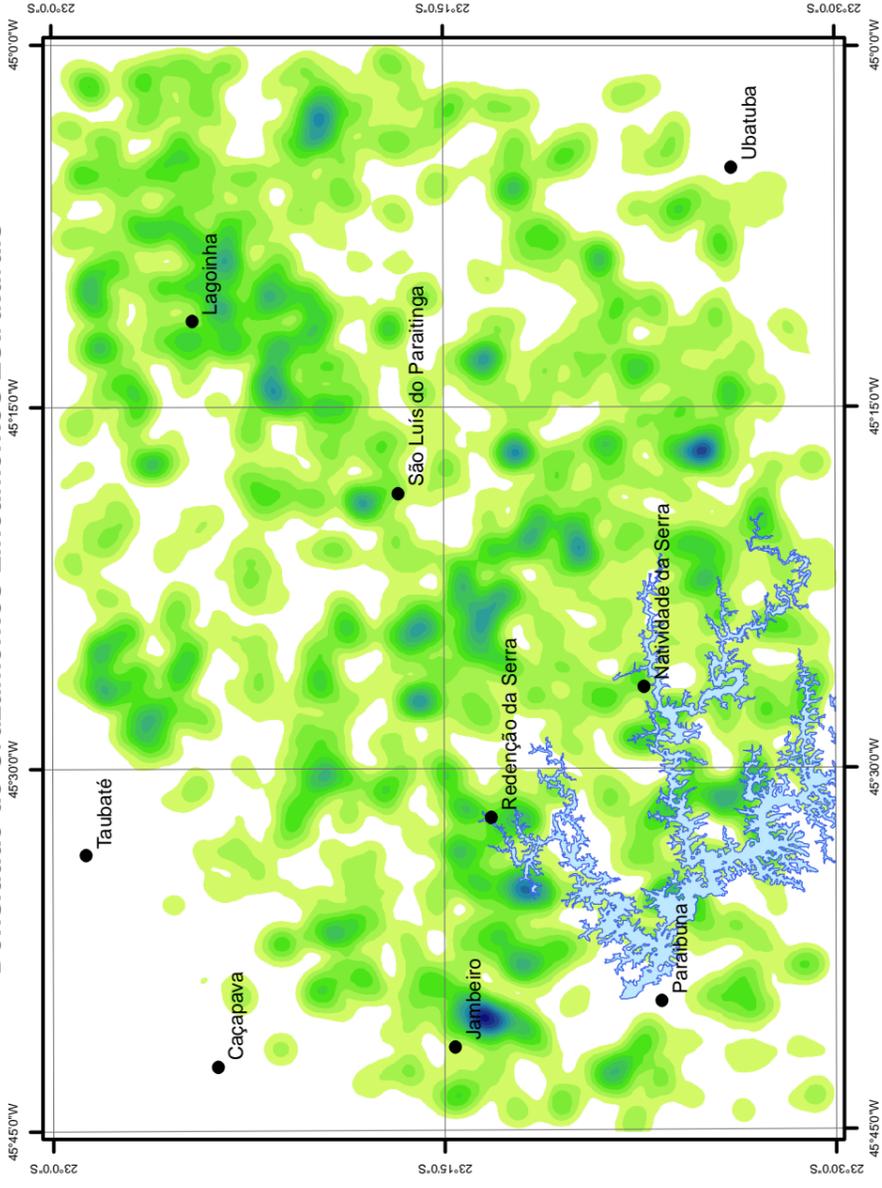


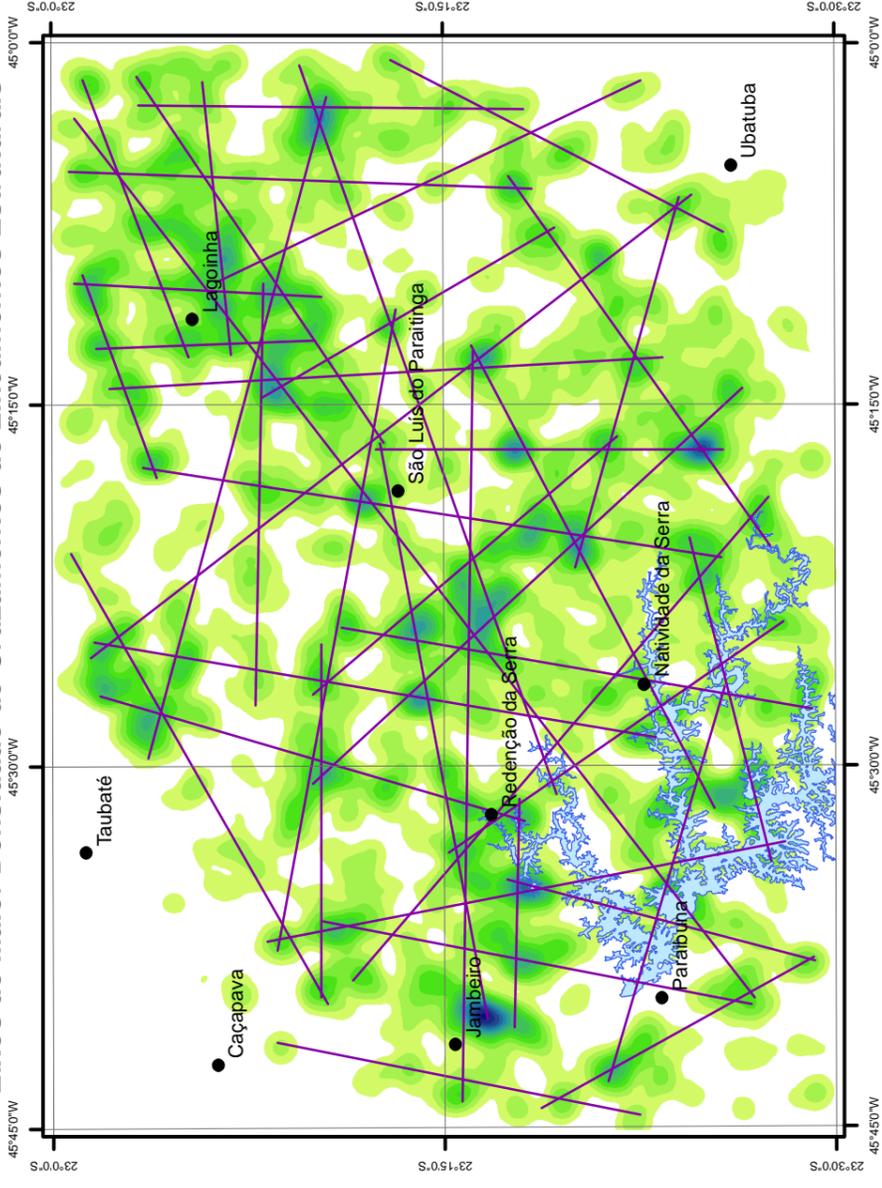
Figura 17 - Representação do mapa de lineamentos estruturais.

Pode ser notada no mapa de densidade de cruzamentos a tendência das zonas de maior densidade de cruzamentos se alinharem em direções preferenciais, segundo eixos de maior densidade (Figura 18).

### Densidade de Cruzamentos Lineamentos Estruturais



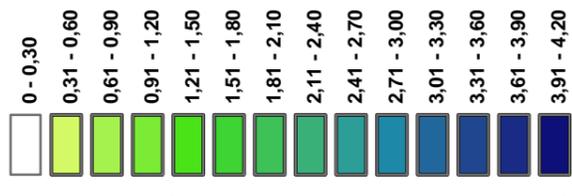
### Eixos de Maior Densidade de Cruzamentos de Lineamentos Estruturais



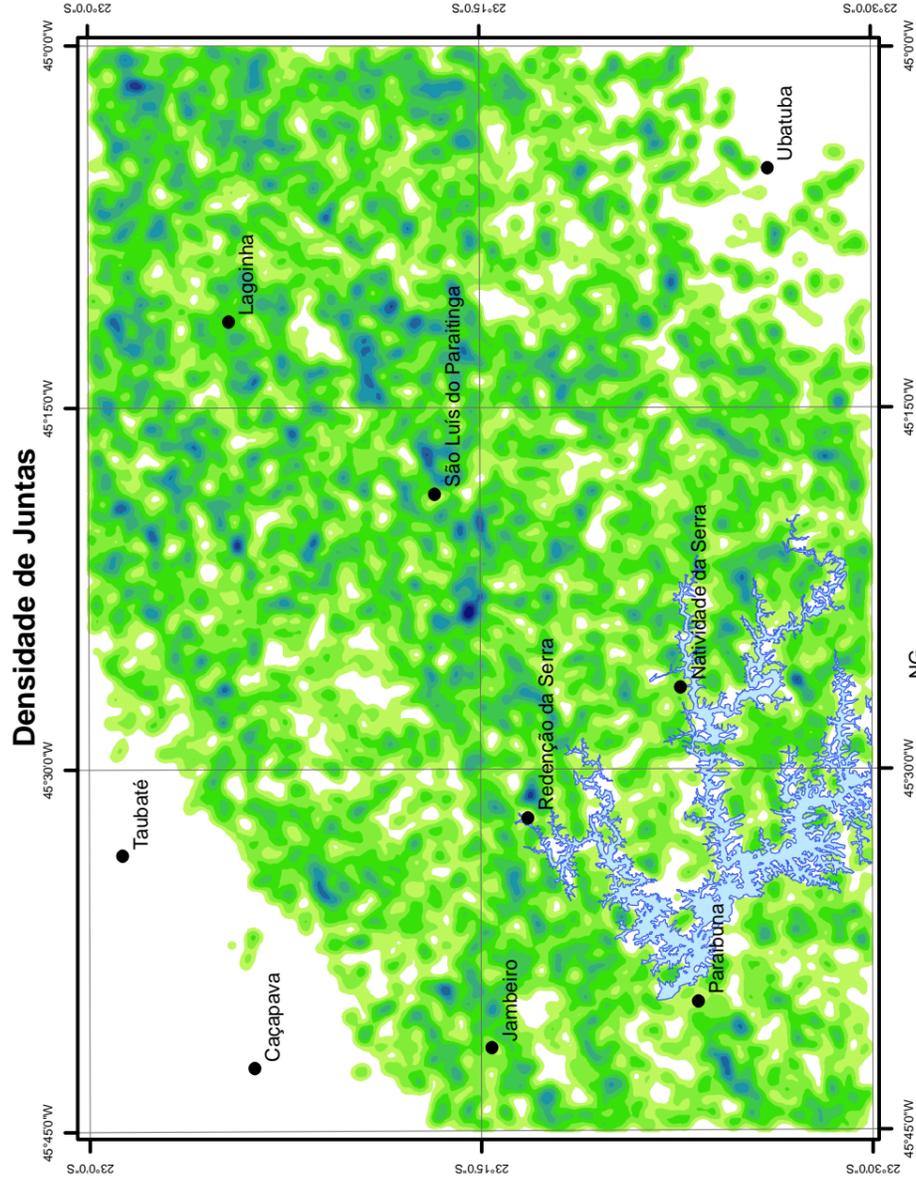
#### Legenda

- Sedes Municipais
- Represa Paraitubuna
- Eixo de Lineamentos
- Eixos de Juntas

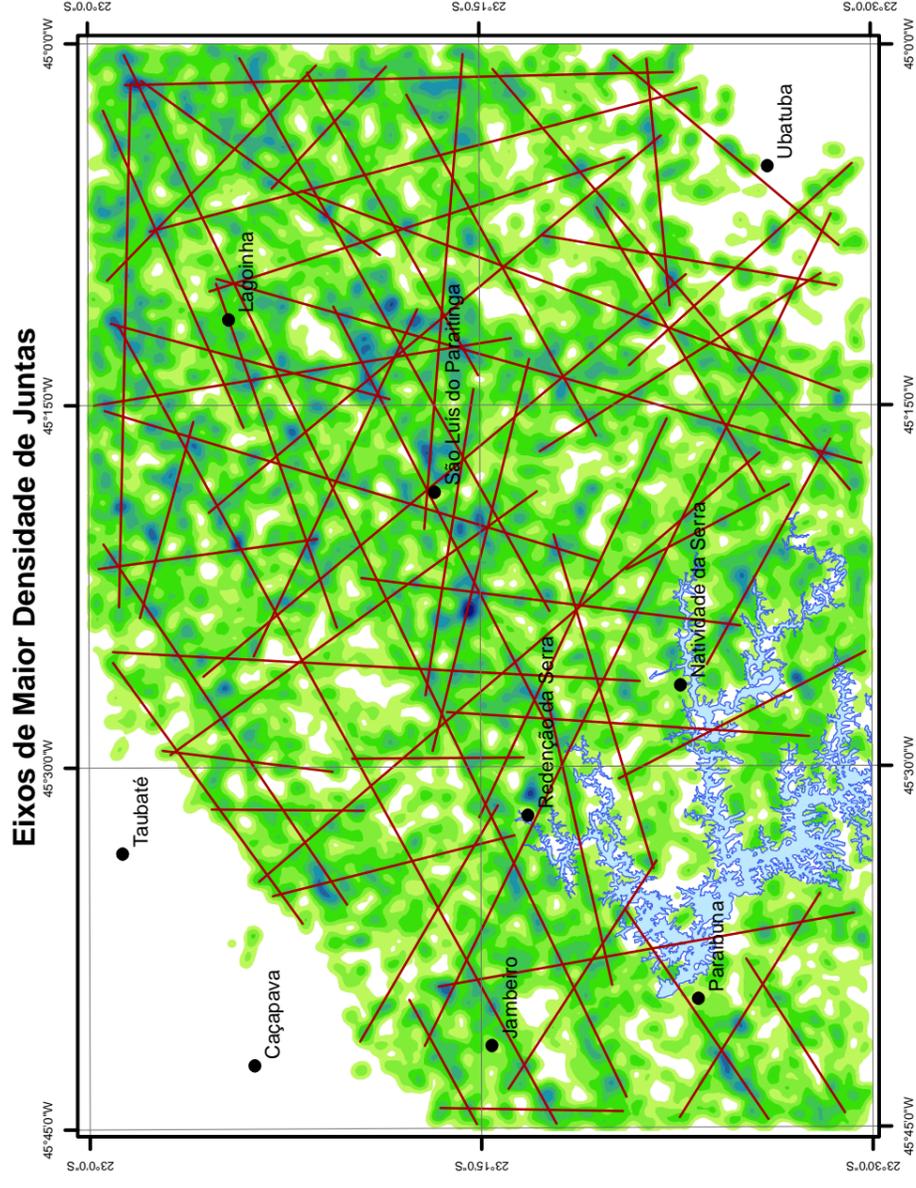
#### Densidade de Cruzamentos em cruzamentos/km<sup>2</sup>



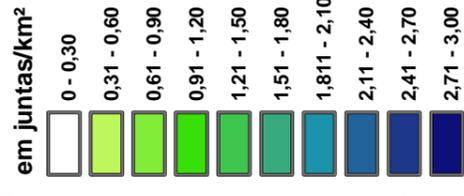
### Densidade de Juntas



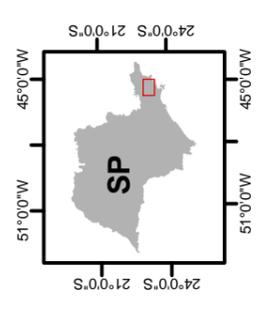
### Eixos de Maior Densidade de Juntas



#### Densidade de Juntas em juntas/km<sup>2</sup>



Localização da Área de Estudo no Estado de São Paulo



fonte: interpretação de Imagem orbital ETM+Landsat 7, banda 8, o220 p076  
 Projeção Transversa de Mercator, datum: WGS 1984 23 S



**Figura 18 - Mapa de Densidade de Cruzamentos de Lineamentos Estruturais e Densidade de Juntas e respectivos eixos de maior densidade.**

Os eixos estão dispostos principalmente nas direções N30W e N45W, com espaçamentos de cerca de 10km, nas direções N05E e Norte-sul, com espaçamento de cerca de 5 km, nas direções N50E e N60E, com espaçamentos de 10 km e também há significativa presença de eixos de direção N75W e Leste-oeste, com espaçamento de 15 a 5 km.

Estes eixos são extremamente relevantes ao estudo de recursos hídricos subterrâneos, visto que são as áreas onde os fraturamentos são mais intensos e se cruzam em diferentes direções, tendendo a representar áreas de maior permeabilidade do maciço, que podem formar corredores de escoamento sub-superficial de água. Já nas áreas onde estes eixos se cruzam há maior possibilidade de serem formados reservatórios de água subterrânea, desde que haja condições propícias para tal. Os eixos podem indicar ainda a direção da tensão cisalhante, quando formam sistemas conjugados em ângulos de 60°, podendo ser representados no elipsóide de deformação, indicando as direções principais dos esforços sofridos na área.

#### **5.2.2.2 Traços de Juntas**

Foram mapeadas um total de 10.418 juntas, atingindo um comprimento máximo de 896 metros e o mínimo de 105 metros, sendo a média de 256 metros e desvio padrão de 88 metros (Figura 19) . As juntas mapeadas apresentam orientação preferencial variando entre as direções N30W e N40W, e uma segunda orientação preferencial nas direções entre N60E e N70E.

Para avaliar a distribuição em área das juntas foi gerado um mapa de densidade de juntas (Figura 18, p. 58). Observando o mapa de densidade de juntas podemos notar que as áreas de maior concentração estão nas densidades entre 1,51 e 3,00 traços de junta por km<sup>2</sup>, sendo que o maior valor encontrado foi de 2,98 juntas/km<sup>2</sup>. As áreas de maior densidade de juntas são mais percolativas e portanto são de grande interesse à recarga de aquíferos, representando porções mais fraturadas dos maciços rochosos. Estas áreas de maior densidade de juntas formam eixos direcionais de zonas de fraqueza, ao longo dos quais a infiltração de águas subterrâneas pode ser favorecida (Figura 18, p.58).

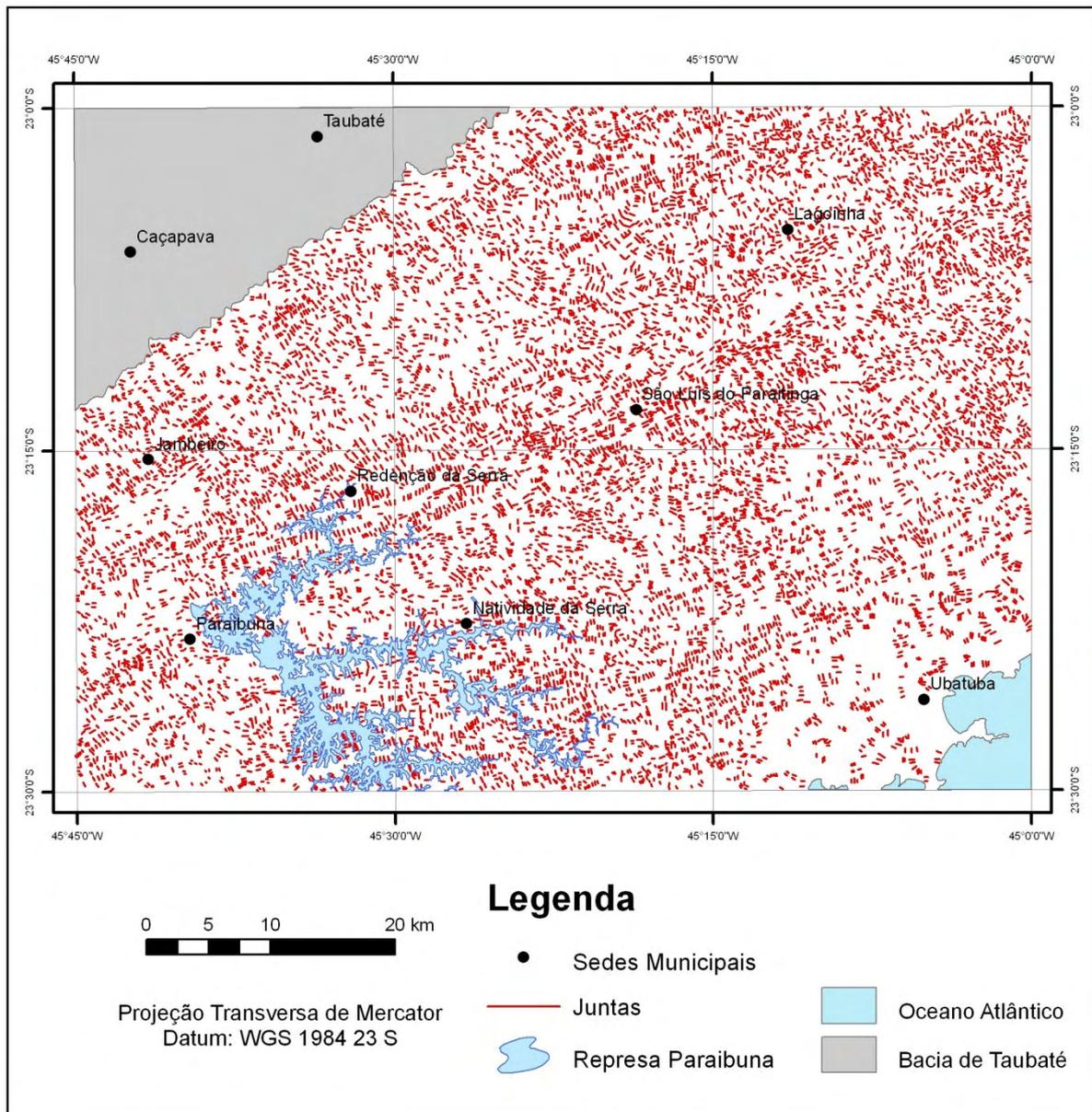


Figura 19 - Representação do Mapa de Juntas.

Os eixos de maior densidade de juntas que foram cartografados neste trabalho possuem comprimentos entre 15 e 78 km, e apresentam uma maior frequência na direção N60E, com eixos que se repetem em um espaçamento de 3 e 8 km. Estes eixos de maior frequência são intrerceptados principalmente por eixos de direção N40W, que possuem espaçamentos entre 5 e 10 km de distância. Em áreas onde os eixos de fraqueza se cruzam, os processos de fraturamento são ainda mais intensos, tornando-se maior a chance de tais fraturas estarem interconectadas e conseqüentemente serem áreas mais percolativas.

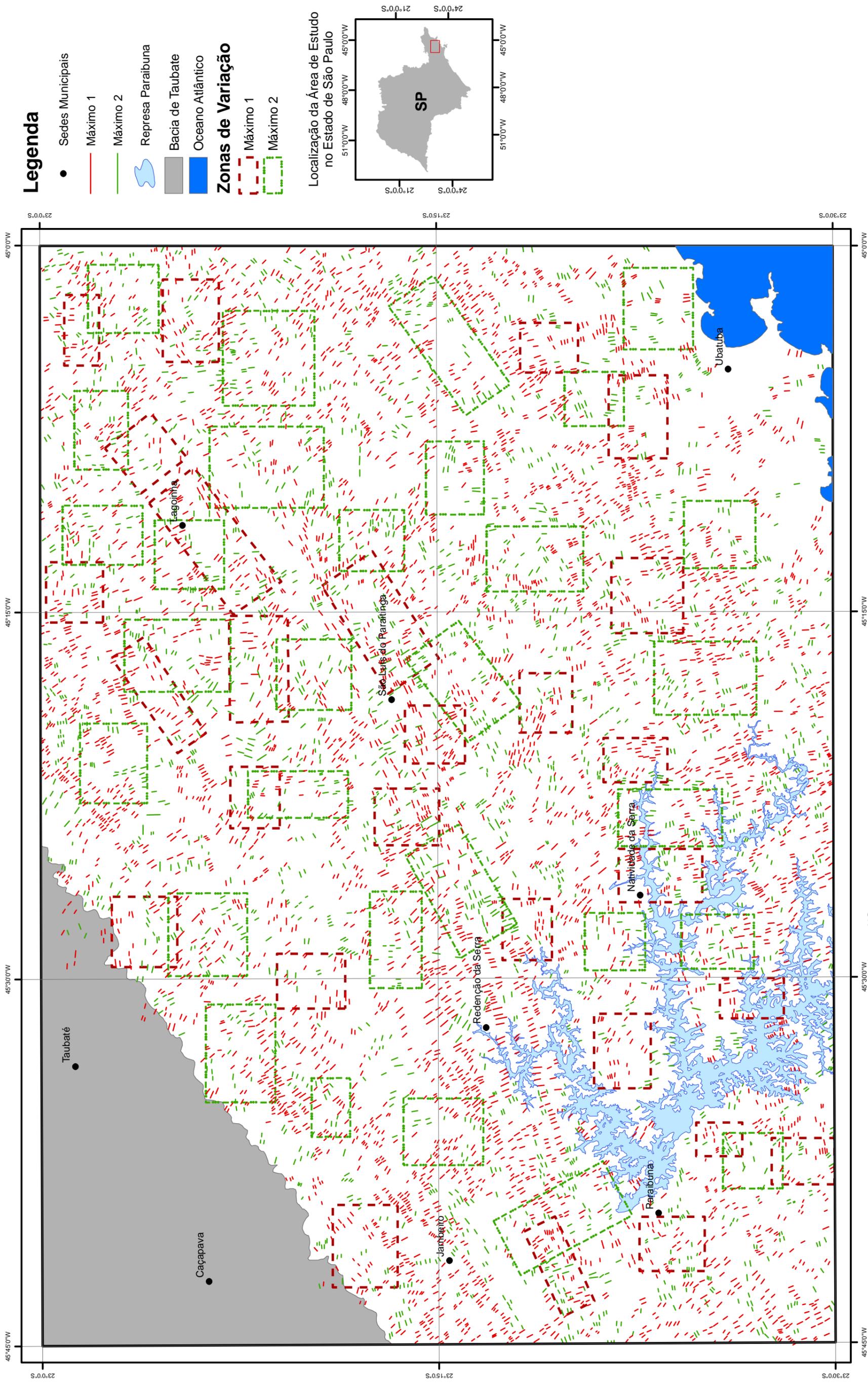
### 5.2.2.2.1 Zonas de variação de máximos 1 e 2

Para identificar zonas de variação no campo de tensão, onde podem estar presentes em maior abundância fraturamentos de direções variadas, foi gerado o mapa de zonas de variação de máximo 1 e zonas de variação de máximo 2, (Figura 20), sendo identificadas 27 zonas de variação de máximo 1 e 30 zonas de variação de máximo 2. Estas zonas de variação de máximo são indicativos da permeabilidade do maciço, devido à presença de fraturas de diferentes direções, podendo ser consideradas boas áreas de recarga de aquíferos, principalmente quando as juntas e outras fraturas são abundantes e as direções de cruzamentos são contrastantes, ou seja, mais próximas da perpendicularidade.

É importante ressaltar que estas zonas representam uma tendência local, podendo ser representativas de tendências regionais quando alinhadas ou agrupadas. Assim, não é recomendado serem feitos cálculos a respeito da área dos polígonos formados pelas zonas de variação, sendo que a zona de variação de máximo pode ser tanto maior quanto menor em subsuperfície do que a área assinalada pelos polígonos. Porém, o alinhamento destas zonas e o seu agrupamento, conjugado com a informação a respeito das direções alinhamento de juntas que estão variando, são de grande relevância para a sua interpretação. Por exemplo, as zonas de variação de máximo 1 de São Luis do Paraitinga, onde se cruzam as direções N60E e N35W, seguem uma tendência regional, com uma repetição deste padrão em um alinhamento que se estende até próximo a Redenção da Serra, um padrão de cruzamento de direções de juntas que está presente inclusive nos máximos 2.

As zonas de variação de máximo 1 e 2 são importantes para a recarga de aquíferos, por serem áreas onde os processos de intemperismo atuam de forma mais eficaz, devido ao intenso fraturamento. Estas áreas estão associadas a mantos de alteração profundos e a processos erosivos mais bem desenvolvidos, podendo apresentar relevos rebaixados, de topografia suave e baixa declividade, favoráveis à infiltração das águas em detrimento do escoamento superficial.

# Mapa de Zonas de Variação de Máximos 1 e 2



fonte: Interpretação de Imagem orbital ETM+Landsat 7, banda 8, o220 p076  
Projeção Transversa de Mercator, datum: WGS 1984 23 S

1:250.000

0 5 10 20 km

NM NG 19°

**Figura 20 - Zonas de Variação de Máximo 1 e Máximo 2**

### 5.2.3 Mapa Síntese Morfoestrutural

Para que sejam observadas em conjunto tanto as deformações rúpteis quanto as deformações dúcteis mapeadas, foi criado o Mapa Síntese Morfoestrutural (Figura 21), onde as feições mais relevantes foram inseridas de forma combinada. Com este mapa é possível observar a morfoestrutura geral da área e a convergência de evidências morfoestruturais favoráveis à identificação de zonas propícias à infiltração, percolação e acúmulo de águas subterrâneas.

Para a identificação de zonas de captação e concentração de águas subterrâneas o Mapa Síntese Morfoestrutural deve ser interpretado levando em consideração que os altos estruturais são as zonas preferenciais de recarga dos aquíferos, e os baixos estruturais são as zonas de concentração de água. As zonas de variação de máximo 1 e 2, bem como as áreas de maior densidade de cruzamento de lineamentos estruturais e seus eixos de alinhamento, agem de forma a acentuar a capacidade destes altos e baixos de captarem e concentrarem o recurso hídrico. Podemos então destacar áreas onde a convergência de evidências nos indica grandes potencialidades para a captação e concentração de águas subterrâneas, tais como:

**Alto Estrutural de Natividade da Serra:** Localizado na porção leste do município de Natividade da Serra, se aproximando do município de Ubatuba, este alto estrutural pode ser considerado uma potencial zona de recarga de aquíferos, devido ao fato de ser um alto muito amplo, conjugado a um alto estrutural menor, possuir uma grande presença de cruzamentos de lineamentos estruturais e de zonas de variação de máximos 1 e 2.

Na área central deste alto estrutural há uma grande presença de descontinuidades, na forma de um feixe alongado segundo a direção N70E e N80E, que podem agir como direcionadoras de fluxos. No flanco norte deste alto estrutural há também grande presença de cruzamentos de lineamentos estruturais e de zonas de variação de máximos 1 e 2, constituindo tanto uma área de transmissão de fluxo aquoso quanto uma zona de recarga.

# Legenda

- Sedes Municipais
- Represa Paraibuna  
Estrutura
- A** Alto Estrutural
- B** Baixo Estrutural
- Descontinuidades
- Contornos Estruturais

## Traços de Juntas

Zonas de Variação

- máximo 1
- máximo 2

Direção

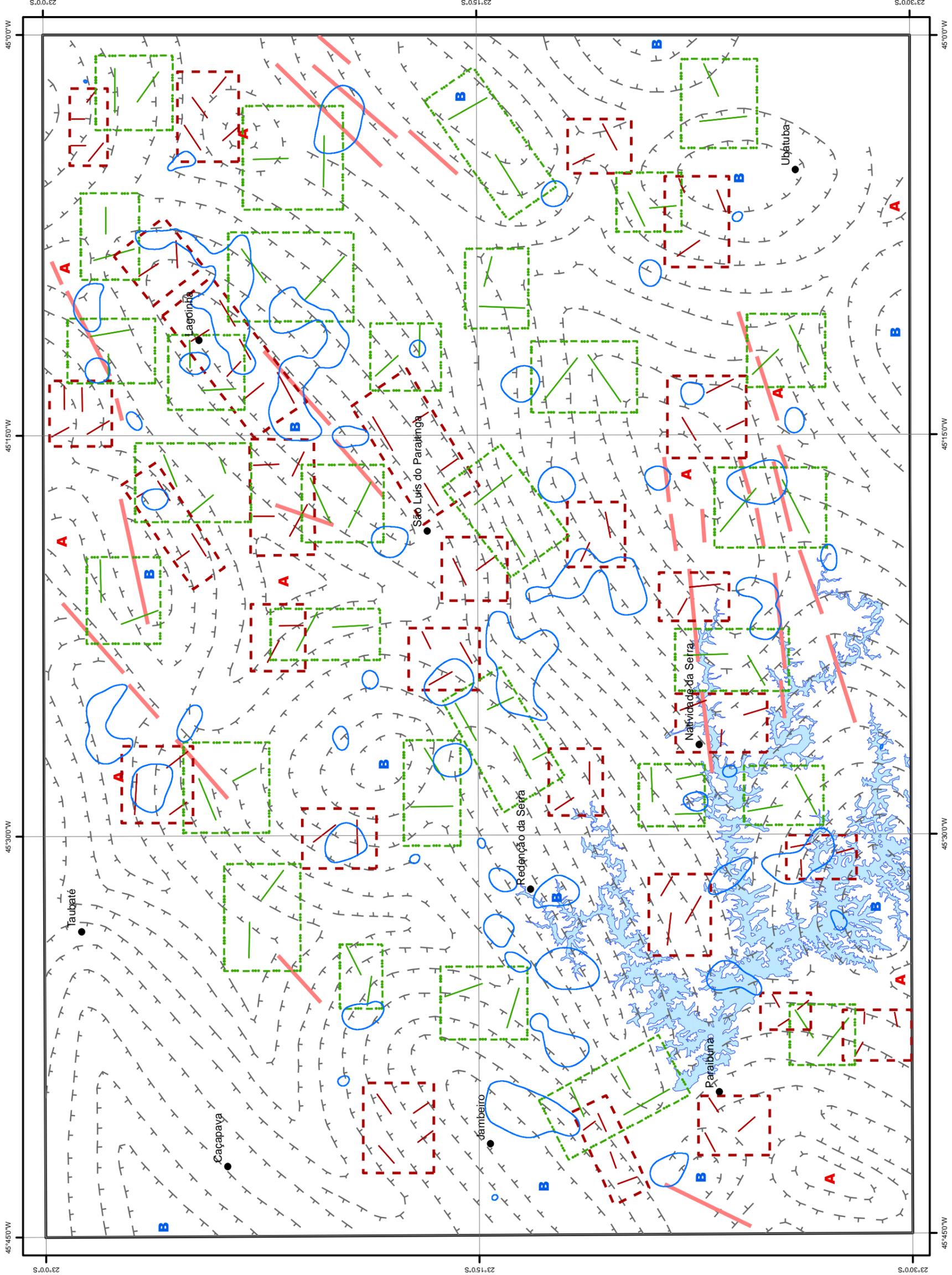
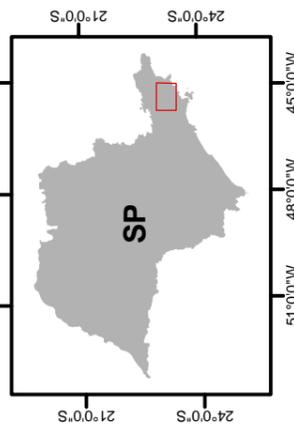
- máximo 1
- máximo 2

## Lineamentos Estruturais

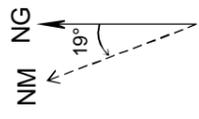
Cruzamentos

isolinha de 1,5 cruz/ km<sup>2</sup>

Localização da Área de Estudo no Estado de São Paulo



1:250.000



Projeção Transversa de Mercator  
Datum: WGS 1984 23 S

Figura 21 - Mapa Síntese Morfoestrutural

**Baixo Estrutural de Lagoinha /São Luis do Paraitinga:** Este baixo estrutural, localizado entre os municípios de Lagoinha e São Luis do Paraitinga, apresenta uma grande variedade de características que o qualificam como uma potencial zona de concentração de água subterrânea, principalmente por ser um baixo estrutural muito grande e alongado e suprido por 3 pequenos altos estruturais presentes nas suas porções Leste, Norte e Oeste e suprido ao Sul pelo grande alto de Natividade da Serra. Este baixo estrutural apresenta grande densidade de cruzamento de lineamentos estruturais e o seu eixo central está localizado em uma grande zona de variação de máximos 1 e se encontra circundado por 7 zonas de variação de máximos 2.

Por ser um baixo estrutural extremamente fraturado ele pode ser considerado não apenas uma boa zona de concentração de águas superficiais, mas também uma boa zona de captação de água, ou seja uma zona de recarga e de acumulação de recursos hídricos, podendo receber águas em sub-superfície dos altos estruturais circundantes e também da infiltração em sua própria superfície. Porém, esse intenso fraturamento o torna uma zona muito vulnerável a agentes poluidores, devendo haver políticas públicas de preservação para áreas com estas características.

É importante ressaltar que as informações morfoestruturais não bastam para definir uma área como de recarga ou de descarga de aquíferos, e sim para caracterizar zonas onde as variáveis do meio físico são propícias à infiltração, percolação e concentração de águas subterrâneas. Para uma área ser definida como de captação ou concentração de água deve ser levado em consideração se realmente há a disponibilidade do recurso hídrico na forma de precipitação ou de escoamento superficial. Porém as morfoestruturas são importantes indicativos das potencialidades regionais e da dinâmica sub-superficial, sendo de grande relevância para estudos de reconhecimento e identificação de áreas a serem priorizadas para estudos de maior detalhe.

### **5.3 Trabalho de Campo**

Após a finalização dos mapeamentos foi realizado um trabalho de campo, com o intuito de testar os critérios fotointerpretativos, confirmar as estruturas mapeadas e se necessário rever as interpretações e/ou os critérios

fotointerpretativos. A Figura 22 mostra a distribuição dos pontos de campo na área de estudo.

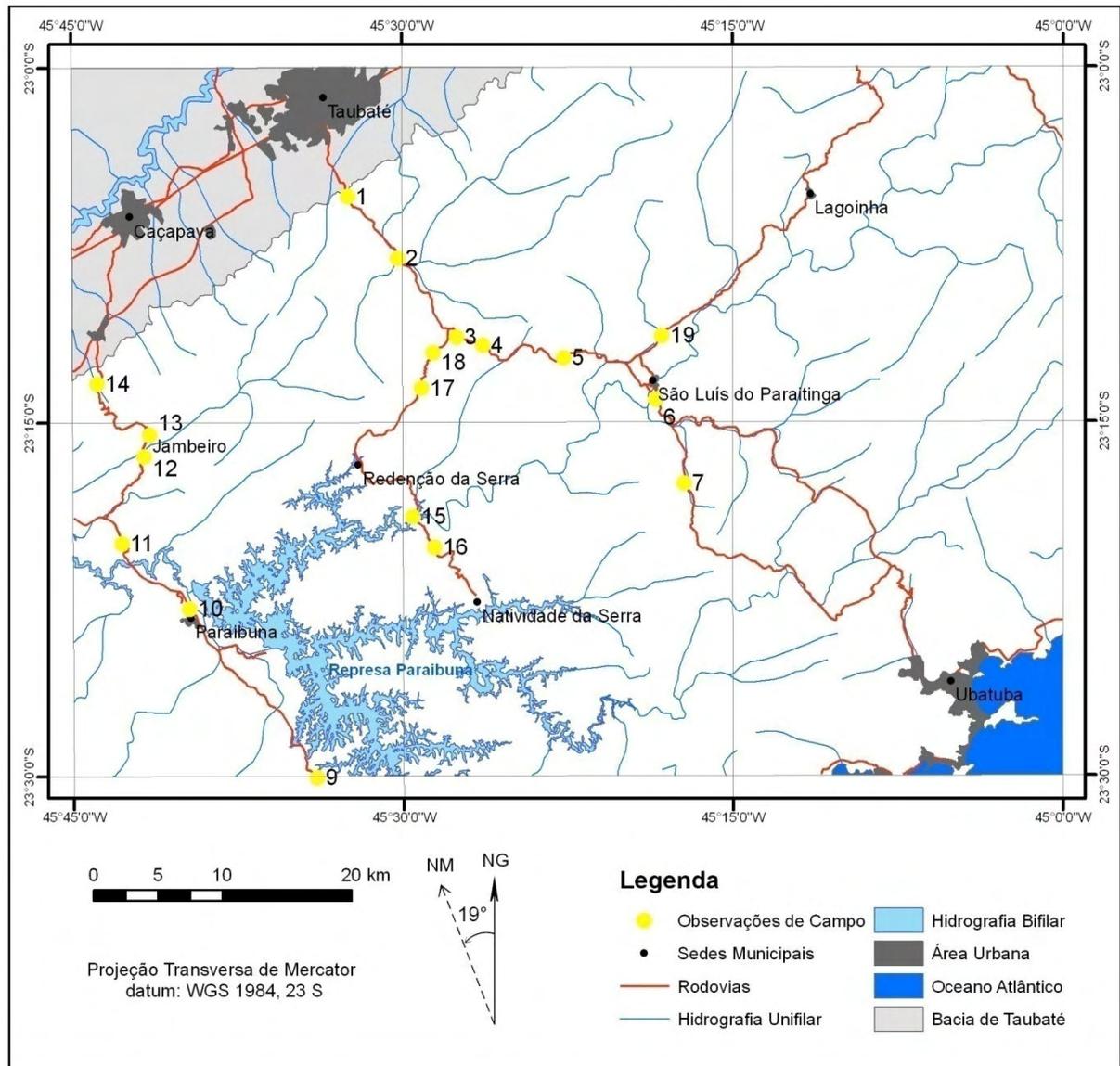


Figura 22 - Localização dos pontos de campo.

O trabalho de campo se deu em cinco dias, durante os quais foram coletadas informações geomorfológicas, litológicas e estruturais em afloramentos de cortes de estrada. Os pontos prioritários de observação de campo foram definidos de acordo com as feições mapeadas, buscando conferir as principais anomalias estruturais e convergências de evidências.

Em alguns locais escolhidos como prioritários não puderam ser levantados dados de campo, devido à falta de afloramentos significativos, ou por oferecer condições de risco aos pesquisadores, como estradas sem acostamento, ou afloramentos dispostos em curvas da estrada. Nas proximidades do município de Lagoinha, por exemplo, é notada a ausência de observações de campo, devido principalmente à escassez de afloramentos de rocha fresca e à ausência de acostamento. Nas proximidades do município de Ubatuba, apesar da abundância de afloramentos, a estrada possui muitas curvas fechadas, acostamento estreito e grande movimentação de veículos, principalmente na descida da serra do Mar.

O ponto 8 se encontra fora dos limites da área de estudo, porém seus dados foram coletados por serem importantes no contexto regional e por ser um afloramento de rocha fresca de fácil acesso, com as estruturas das rochas bem preservadas.

Foram priorizadas as coletas de dados referentes às fraturas mais representativas de cada afloramento, com destaque às fraturas que formam sistemas e séries e às fraturas que se cruzam, principalmente as que compõem diedros de rompimento (Figuras 23 e 24). Outros dados importantes coletados em campo foram o espaçamento das fraturas que formam séries, a existência e espessura de abertura das fraturas e o preenchimento destas aberturas (Figura 25).

Estes dados são de grande importância para o comportamento da rocha na presença de fluxo aquoso, tendo em vista que são determinantes para a permeabilidade secundária do maciço.

Foram medidas também as atitudes de foliação das rochas (Figura 26), as quais foram confrontadas com o mapa morfoestrutural, para ser conferida a consistência da informação contida nas linhas de contorno estrutural. Todas as medidas de foliação corresponderam às obtidas pelo mapeamento morfoestrutural, com exceção das foliações perturbadas por flexuras de caráter local.

Em áreas onde o maciço rochoso se encontra muito alterado houve grande dificuldade em realizar medições precisas das fraturas e foliações, devido ao mascaramento e destruição das estruturas das rochas pelos agentes intempéricos. Em certos afloramentos não foram encontradas fraturas significativas ou passíveis de medição.



Figura 23 - Fraturas abertas, em rocha migmatítica, formando série com espaçamento de 20 cm. Ponto 09, rumo da foto: azimute 40.



Figura 24 - Fraturas em rocha do tipo quartzo muscovita xisto, formando séries e sistemas conjugados, na forma de diedros de rompimento. Ponto 11, rumo da foto: azimute 250.



Figura 25 - Fraturas em rocha xistosa, abertas, preenchidas por argila, formando sistema conjugado. Ponto 04, rumo da foto: azimuth 75.

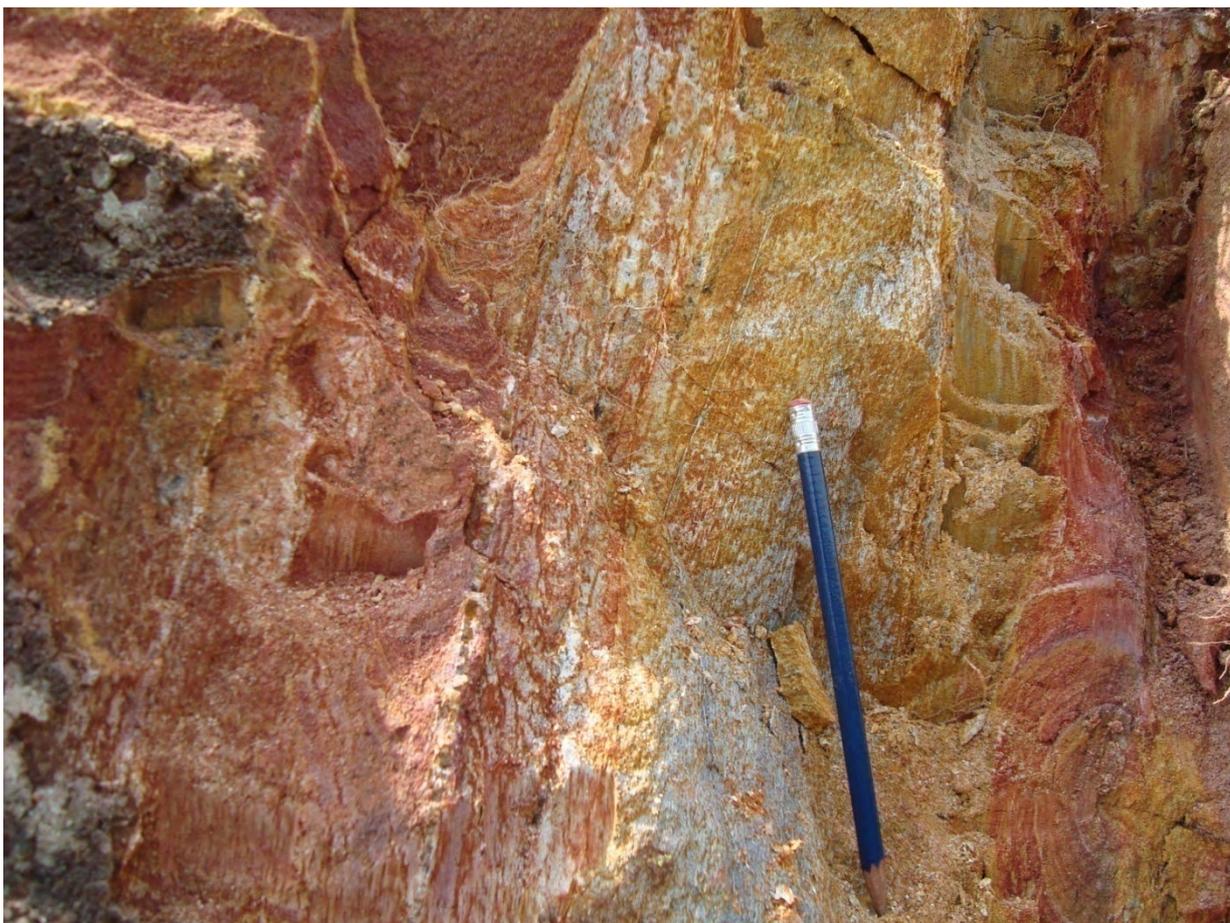


Figura 26 - Xisto com foliação 70/80NW. Ponto 10, rumo da foto: azimute 95.

Quando possível foram conferidos também os limites das unidades geoambientais e as propriedades geotécnicas, a partir da correlação entre a fotointerpretação e o comportamento dos corpos rochosos verificados em campo.

As formas de relevo também foram observadas e realizados registros fotográficos nos pontos de medições de afloramentos e também nos contatos geomorfológicos. Foram feitos ainda registros fotográficos das formas de relevo representativas dos critérios fotointerpretativos adotados. Na Figura 27 podemos observar um corpo granítico apresentando relevo do tipo convexo, não resistente à erosão segundo os critérios adotados. Na Figura 28 temos um relevo do tipo côncavo-convexo em primeiro plano, classificado como pouco resistente à erosão e ao fundo um relevo do tipo côncavo-retilíneo-convexo, classificado como resistente à erosão.

Os dados e informações coletados em campo foram essenciais para confirmação e complementação das informações mapeadas, para avaliar a

necessidade de ajustes nos critérios fotointerpretativos e para dar segurança às interpretações dos mapas. Os dados coletados em campo foram tabulados em planilhas e são apresentados neste trabalho na sessão anexos.



Figura 27 - Corpo granítico apresentando relevo do tipo convexo, entre os municípios de Redenção da Serra e Natividade da Serra.



Figura 28 - Relevo do tipo côncavo-convexo em primeiro plano e côncavo-retilíneo-convexo ao fundo. Município de Lagoinha.

#### **5.4 Mapa de Zonas de Captura e Concentração de Águas Subterrâneas**

Como forma de integrar os resultados obtidos com os mapeamentos as informações geradas pelos mapas foram apresentadas de forma sintética em um mapa integrado, de modo a priorizar os elementos de maior relevância para o estudo de recursos hídricos.

No Mapa de Zonas de Captura e Concentração de Águas Subterrâneas (Figura 29) a combinação entre o Mapa de Unidades Geoambientais e o Mapa Síntese Morfoestrutural aponta maiores detalhes a respeito das potencialidades das unidades mapeadas em captar, transmitir e acumular águas subterrâneas, como por exemplo, o Alto Estrutural de Natividade da Serra, associado a unidades geoambientais classificadas nos três níveis de maior Permeabilidade e com Alterabilidade favorável à percolação, elevando ainda mais a potencialidade deste

alto estrutural como zona de recarga de aquíferos subterrâneos. Já o Baixo Estrutural de Lagoinha/São Luis do Paraitinga está localizado em unidades com Permeabilidade e Alterabilidade pouco favoráveis à percolação, reduzidas as suas chances de ser caracterizado como boa zona de recarga, porém mantendo a sua característica de potencial zona de acumulação de águas subterrâneas.

O baixo estrutural localizado no município de Jambeiro se mostra uma zona com boa potencialidade de acumulação de água e com potencialidade de ser também uma zona de recarga de aquíferos, sendo que apresenta grande concentração de cruzamento de lineamentos estruturais, zonas de variação de máximos 1 e 2, principalmente em seu flanco NE, e está relacionado a unidades geoambientais de grande potencial percolativo, com permeabilidade alta, pouco resistentes à erosão e muito fraturadas.

No alto estrutural localizado 13 km a leste de Lagoinha é observada também uma convergência de evidências que indicam uma boa potencialidade de recarga de aquíferos subterrâneos, sendo que o alto estrutural em questão está localizado entre duas áreas de alta densidade de cruzamento de lineamentos estruturais. Estão presentes também zonas de variação de máximo 1 e máximo 2, de direções de variação praticamente perpendiculares nos máximos 1 e direções de variação de máximo 2 perpendiculares. Como o centro do alto estrutural está localizado entre as duas zonas de variação, podem estar presentes as quatro direções preferenciais no seu fraturamento. Além das evidências morfoestruturais, as unidades geoambientais apresentam propriedades também favoráveis à percolação de fluidos, de Permeabilidade Permeável e Muito Permeável, de Ruptibilidade Fraturado e Muito Fraturado e de Alterabilidade Pouco Resistente e Resistente à erosão. A diversificação de direções de fraturamento se reflete na propriedade Tropa, estando as unidades nas classes Não Orientado e Pouco Orientado.

O baixo estrutural localizado 15 km a oeste de Lagoinha também tem o seu centro localizado em uma unidade geoambiental favorável à captação e concentração de águas subterrâneas, classificada como muito permeável, fraturada, resistente à erosão e pouco orientada. O baixo está numa zona de variação de máximo 1 e 2 e possui altos estruturais nos seus limites norte e sul.

# Legenda

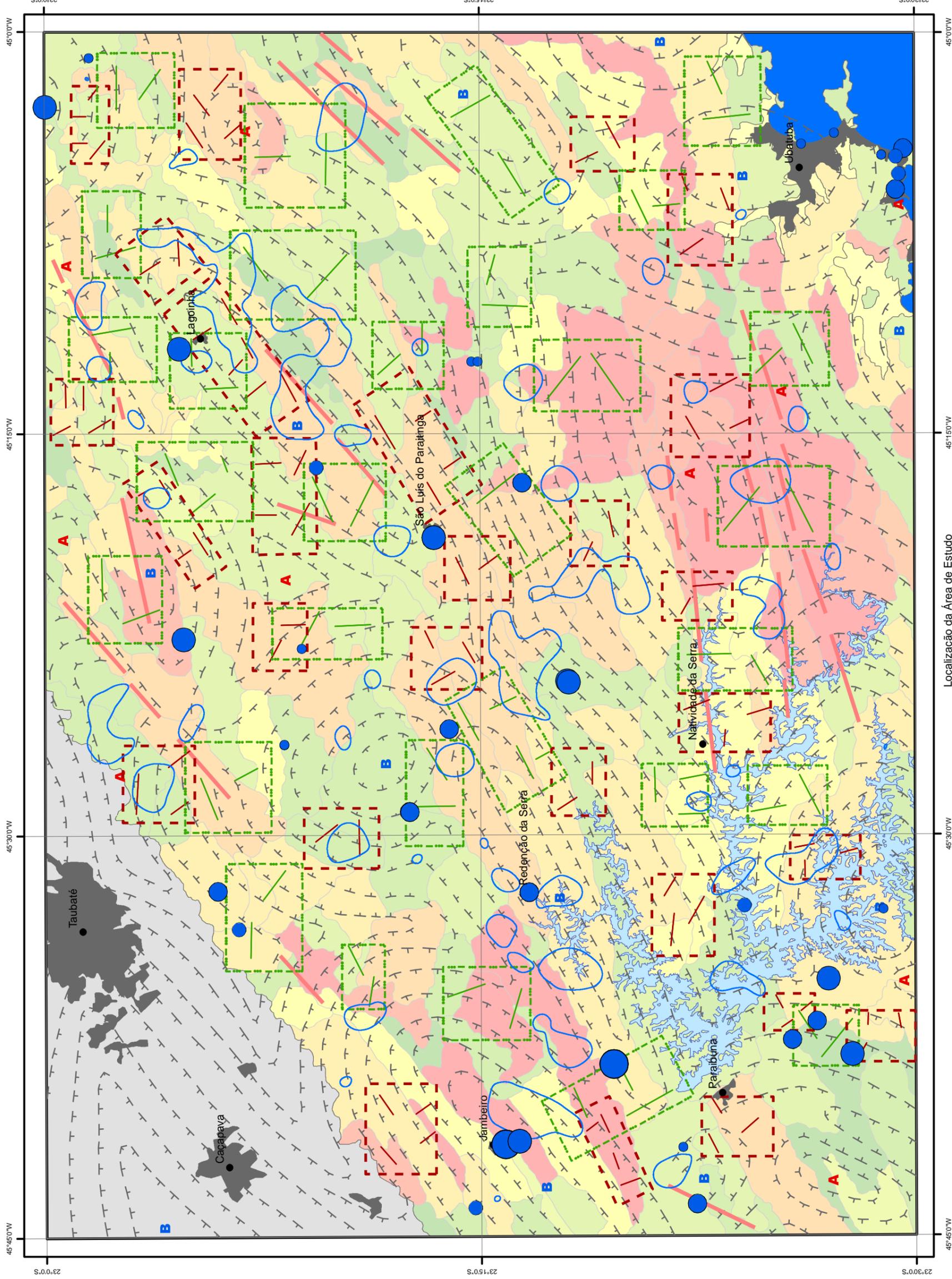
- Sedes Municipais
- Estrutura**
- A** Alto Estrutural
- B** Baixo Estrutural
- Descontinuidades
- Contornos Estruturais
- Represa Paraíbauna
- Juntas**
- Zonas de Variação
- máximo 1
- máximo 2
- Direção**
- máximo 1
- máximo 2
- Lineamentos Estruturais**
- Cruzamentos**
- isolinha de 1,5 cruz/ km<sup>2</sup>

## UGS

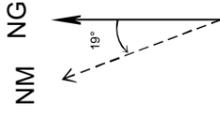
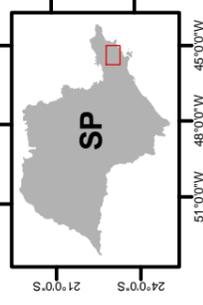
- Permeabilidade, Ruptibilidade**
- mP- Muito Permeável, mF- Muito Fraturado
  - mP- Muito Permeável, F- Fraturado
  - mP- Muito Permeável, pF- Pouco Fraturado
  - P- Permeável, mF- Muito Fraturado
  - P- Permeável, F- Fraturado
  - P- Permeável, pF- Pouco Fraturado
  - pP- Pouco Permeável, mF- Muito Fraturado
  - pP- Pouco Permeável, F- Fraturado
  - pP- Pouco Permeável, pF- Pouco Fraturado
  - nP- Não Permeável, F- Fraturado
  - nP- Não Permeável, pF- Pouco Fraturado

## Vazão de poços em m<sup>3</sup>/h

- 0 - 1
- 1,1 - 3,5
- 3,6 - 8,5
- 8,6 - 18
- 18,1 - 46,5



Localização da Área de Estudo no Estado de São Paulo



1:250.000

Projeção Transversa de Mercator  
Datum: WGS 1984 23 S

Figura 29 - Mapa de Zonas de Captura e Concentração de Águas Subterrâneas

Os dados de vazão de poços, apesar de não serem muito bem distribuídos em área, apontam a tendência de concentração de água subterrânea. São observadas vazões maiores nos baixos estruturais de Jambeiro e de Lagoinha/São Luis do Paraitinga e no baixo estrutural a oeste de Lagoinha. As vazões são maiores nas direções do eixo principal de densidade de cruzamentos de lineamentos estruturais e de juntas, acompanhando os cinturões de cisalhamento, e menores nos flancos dos altos estruturais.

O Mapa de Zonas de Captura e Concentração de Águas Subterrâneas demonstra grande convergência de evidências na região centro-oeste da área de estudo, justamente onde se encontra um baixo estrutural de caráter regional e está sobre influência de dois altos estruturais de caráter mais local. Tais altos estruturais estão suprindo o baixo estrutural com água, o que o torna uma boa estrutura reservatório.

É importante ser notado que este baixo estrutural em questão está em uma zona de intenso fraturamento, com presença dos principais eixos de densidade de traços de juntas e com as maiores densidades de cruzamento de lineamentos estruturais. Por agirem como percoladores de água, tais fraturas podem colaborar com a captação do recurso hídrico e intensificar o suprimento de água, ou podem abrir a estrutura sinforme, o que permitiria a fuga do recurso. Estudos de maior detalhe na área em questão podem responder a estas questões.

Logo ao sul do baixo estrutural principal, no extremo SW da área de estudo, podem ser observadas duas zonas classificadas como muito permeáveis, de muito alta densidade textural e muito fraturadas que são interceptadas por um eixo de alinhamentos de zonas de alta densidade de traços de juntas, podendo ser considerada uma importante zona de captura de água, principalmente por estar localizada muito próxima à principal área de acumulação de recursos hídricos subterrâneos identificada no mapeamento, o baixo estrutural de Lagoinha/São Luís do Paraitinga.

Outra região de grande potencial à captação dos recursos hídricos localiza-se no extremo Norte da área de estudo, onde foi identificado um alto estrutural com presença de grande densidade de traços de juntas.

Para confirmar as afirmações a respeito da potencialidade de captação e concentração de recursos hídricos das estruturas mapeadas é necessário que sejam

realizados estudos de maior detalhe e que seja feita uma análise comparativa da distribuição das estruturas com a distribuição das chuvas. Este estudo de detalhe poderá identificar áreas favoráveis à locação de poços para captação de água.

Assim as áreas identificadas pelo mapeamento são as mais favoráveis à prospecção de água subterrânea, mas não necessariamente as áreas onde este recurso é mais abundante e acessível, havendo necessidade de estudos de maior detalhe para tal afirmação.

## CAPÍTULO VI

### 6 Conclusões

As zonas de recarga identificadas pelo mapeamento morfoestrutural se referem aos altos estruturais, com presença de zonas variação de máximos de 1 e 2 e densidade de cruzamentos lineamentos estruturais acima de 1,5 cruz/km<sup>2</sup>. Esta convergência de evidências foi encontrada principalmente no Alto Estrutural de Natividade da Serra. O Mapa de Unidades Geoambientais corroborou com tais evidências, sendo que as propriedades geotécnicas indicaram se tratar de uma grande área com alterabilidade Pouco Resistente à erosão, de ruptibilidade Fraturado e Muito Fraturado, tropia Pouco Orientado e Orientado e de permeabilidade Muito Permeável.

O Baixo Estrutural de Lagoinha/São Luis do Paraitinga apresentou as melhores condições morfoestruturais para a concentração de águas subterrâneas, principalmente pela sua grande forma alongada, disposta entre cinco altos estruturais, pela presença de importantes zonas de variação de máximos 1 e 2 e de uma grande densidade de cruzamento de lineamentos estruturais. O mapeamento geoambiental apontou que as propriedades geotécnicas deste baixo são: alterabilidade Pouco Resistente à erosão; ruptibilidade Fraturado e Muito Fraturado;

permeabilidade Permeável e Pouco Permeável e tropia Orientado, Pouco Orientado e Não Orientado.

Outra importante zona de concentração de águas subterrâneas identificada pelo mapeamento foi o Baixo Estrutural de Jambeiro, com grande presença de zonas de variação de máximos 1 e 2, alta densidade de cruzamento de lineamentos estruturais e agrupamentos de unidades geoambientais nas classes de permeabilidade Permeável e Muito Permeável e ruptibilidade Fraturado e Muito fraturado.

As áreas de maiores densidades de cruzamentos de lineamentos estruturais e de maiores densidades de traços de juntas apresentaram eixos direcionais de zonas de maior densidade, com padrões de repetição em direções preferenciais e espaçamentos regulares.

As maiores densidades de cruzamento de lineamentos estruturais formaram eixos alinhados segundo as direções preferenciais: entre N30W e N45W, com espaçamentos de 10 km; entre as direções N05E e Norte-sul, com espaçamentos de 5 km e entre as direções N50E e N60E com espaçamentos de 10 km.

Os eixos preferenciais de altas densidades de juntas estão orientados principalmente na direção N60E, com espaçamentos de 3 a 8 km e na direção N40W, com espaçamentos de 5 a 10 km.

O Mapa Morfoestrutural e o Mapa de Unidades Geoambientais, obtidos a partir de produtos de sensoriamento remoto, aliados a produtos topográficos, apresentaram um grande volume de informação quando combinados na forma do Mapa de Zonas de Captura e Concentração de Águas Subterrâneas, facilitando a visualização da convergência de evidências.

Assim as técnicas de mapeamento e critérios fotointerpretativos adotados se mostraram eficientes no estudo de recursos hídricos subterrâneos. Porém o mapa final não pode ser considerado um mapa conclusivo da disponibilidade dos recursos hídricos, e sim um indicador das potencialidades das unidades mapeadas em captar, transmitir e concentrar os recursos hídricos, se fazendo necessários estudos de maior detalhe, em escalas maiores para que afirmações mais seguras sejam feitas.

Não foi possível concluir quais das variáveis estudadas são de maior importância na definição da capacidade do maciço em captar, transmitir e concentrar águas subterrâneas. Para isso seria necessário um volume maior de dados de vazão de poços e com uma distribuição regular em área, permitindo análises

comparativas com maior significado estatístico. Ensaio geofísicos de Sondagens Elétricas Verticais também poderiam colaborar neste sentido, colaborando na produção de um mapa potenciométrico de detalhe da área.

As potencialidades das unidades e estruturas mapeadas em captar, transmitir e concentrar água foram estimadas levando em consideração principalmente o seu grau de participação no fraturamento do maciço e na interconexão de fraturas, bem como outras características que venham a colaborar com a permeabilidade do maciço, porém não foi possível fazer uma correlação direta deste grau de participação com a presença do recurso hídrico, não sendo possível então afirmar quais elementos morfoestruturais e propriedades geotécnicas estão mais fortemente envolvidos no processo de recarga e acumulação de água nos aquíferos.

### Referências Bibliográficas

ALMEIDA, F.F.M de. *Fundamentos Geológicos do Relevo Paulista*. São Paulo: Instituto de Geografia, Universidade de São Paulo, 1964. 99p. (Série Teses e Monografias)

ALMEIDA, F. F. M. & HASUI, Y. *O Pré-Cambriano do Brasil*. Ed. Edgard Blucher, 1984, 378pp.

ALMEIDA, F. F. M. The system of continental rift bordering the Santos Basin, Brazil. *Anais da academia brasileira de ciências*. Rio de Janeiro, 1976, 48 *Supl.*: 15-26

ALMEIDA, F.F.M. de Vale do Paraíba. In: RELATÓRIO ANUAL DO DIRETOR. Rio de Janeiro, DNPM/Div. Geol. Min. Boletim 139. 1952

BORGES, M. da S.; COSTA, J. B. S. da; HASUI, Y.; PIRES NETO, A. G.; MORALES, N.; JIMENEZ-RUEDA, J. R. Compartimentação neotectônica do sudeste do Brasil. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 40. Belo Horizonte-BH. *Anais*. SBG-MG. p. 74. 1998.

CAMPOS; J.M. A jazida pirobotuminosa do Vale do Paraíba. *Eng. Miner. Metal*. Rio de Janeiro, 16 (96): 417-421. 1952

CARNEIRO, C. D. R. *Geologia e Evolução Geológica da folha São José dos Campos*. Tese. Inst. Geol. Univ. São Paulo. São Paulo. 1977.

CARNEIRO, C.D.R.; HASUI, Y; GIANCURSI, F. D. – 1976 – Estrutura da bacia de Taubaté na região de São José dos Campos. In. Congr. Brás. Geol., 29, Ouro Preto, *Anais...* SBG.

CAVALCANTE, J. C. & KAEFER, L. Q. Geologia da folha Santos (parcial). *Anais...* XXVIII Cong. Brás. Geol. Porto Alegre, 4:227-246. 1974.

CHANG, H. K.; KOWSMANN, R. O.; FIGUEIREDO, A. M. F.; BENDER, A. A. Tectonic and stratigraphy of East Brazilian Rift System: an overview. *Tectonophysics*, 213 (1/2): 97-138, 1992

CONTI, José Bueno. *Circulação Secundária e Efeito Orográfico na Gênese das Chuvas na Região Lesnordeste Paulista*. São Paulo: IGEOG/USP, 1975. 82p.

GUY, M. Quelques principes e quelques expériences sur la methodologie de la photo-interpretation. In: Symp. Intern. Photo-Interpretation, 2., Paris, *Acte...* v.1, p. 21-41. 1966.

HASUI, Y. & PONÇANO, W, L. Organização estrutural e evolução da bacia de Taubaté. In: Cong. Bras. Geol. 30. Recife. *Anais...* SBG. p. 368-81. 1978.

HASUI, Y. & SADOWSKKI, G. R. – 1976 – Evolução geológica do Pré-cambriano da região sudeste do Estado de São Paulo.; *Rev. Bras. De Geol.* 6:182-200.

HASUI, Y.; COSTA, J. B. S. da; BORGES, M. da S.; MORALES, N.; JIMENEZ-RUEDA, J. R. Evolução morfotectônica do sudeste do Brasil. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 40. Belo Horizonte-BH. *Anais...* SBG-MG. p. 78. 1998.

HASUI, Y.; FONSECA, M. J. G.; RAMALHO, R. A parte central da região de dobramentos sudeste e o maciço mediano de Guaxupé. In: Scobbenhaus et al. (coord.) Geologia do Brasil. Brasília, DNPM, cap. 7, p. 307-328. 1984.

HASUI, Y.; PENALVA, F.; HENNIES, W.T. Geologia do Grupo São Roque. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 23., Salvador, 1969. *Anais...* Salvador, SBG, p. 101-134. 1969

HASUI, Y.; PONÇANO, W.L.; BISTRICH, C.A.; STEIN, D.P.; GALVÃO, C.A.C.F.; GOMENEZ, A.F.; ALMEIDA, M.A.; MELO, M.S. PIRES NETO, A.G. As grandes falhas do leste paulista. In: Simpósio de Geologia Regional, Sociedade Brasileira de Geologia, 1., São Paulo, 1977. *Atas...* São Paulo, SBG, pp 369-378. 1977.

HASUI, Y; GIMENEZ, A.F.; MELO, M. S.- Sobre as bacias tafrogênicas continentais do sudeste brasileiro. 30° Cong, Brás. Geol., *Anais*, Recife, SBSR, 1 : 382-391, 1978.

HASUI, Y; PONÇANO, W.L; BISTRICHI, C.A; STEIN,D.P; GALVÃO,C.A.C.F; GIMENEZ, A.F; ALMEIDA, M.A; NETO, A.G.P; MELO, M.S; SANTOS, M.C.S.R. *Geologia da Região Administrativa 3 (Vale do Paraíba) e parte da Região Administrativa 2 (Litoral) do Estado de São Paulo – Divisão de Minas e Geologia Aplicada*, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, SP, 1978b.

HENNIES, W. T.; HASUI, Y; PENALVA, F. O falhamento transcorrente Taxaquara. *Anais...* XXI Cong. Geol. P. 159-168. Curitiba. 1967

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - Mapa Geológico do Estado de São Paulo, 1:500.000, Nota explicativa. São Paulo, IPT. 126p. 1981 (Série Monografias nº6)

IPT/PRÓ MINÉRIO Geologia das folhas Jacareí (SF 23-Y-D-II-3), Tremembé (SF 23-Y-B-V-4), Taubaté (SF 23-Y-B-II, 2) e Pindamonhangaba (SF 23-Y-B-VI-3), escala 1:50.000, estado de São Paulo. São Paulo, IPT/Pró-Minério, v. 1, 276 p. 1990

JIMÉNEZ-RUEDA, J.R.; NUNES, E.; MATTOS, J. T. Caracterização Fisiográfica e Morfoestrutural da Folha São José de Mipibu – RN. *Geociências*. São Paulo. v.12, n.2, p.481-491, 1993.

LOCZY, L.; LADEIRA, E.A. *Geologia estrutural e introdução à geotectônica*. Ed. Edgard Blucher, Rio de Janeiro, CNPq, 1980, 134p.

LOUSADA, E. O. ; CAMPOS, J. E. G. . Integração de dados geológicos, geofísicos e de sensoriamento remoto para a locação de poços tubulares. *Revista de Geociências* (Rio de Janeiro), v. 24, p. 173-180, 2005.

MADRUCCI, V.; ARAÚJO, C. C.; TAIOLI, F. Sensoriamento remoto, aerogeofísica e geoprocessamento aplicados ao estudo de aquífero fraturado em terreno cristalino, leste do Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 33 (2), p. 43-52, Jun 2003.

MADRUCCI, V.; TAIOLI, F.; ARAÚJO, C. C. Análise integrada de dados de sensoriamento remoto, geologia e geofísica no estudo de aquífero fraturado, Lindóia- SP. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 23 (4), p. 437-451, 2005.

MATTOS, J.T.; BALIEIRO, M.G.; SOARES, P.C.; BARCELLOS, P.E.; MENESES, P.R.; CSORDAS S.M. *Análise morfoestrutural com uso de imagens MSS-Landsat e radar para pesquisa de hidrocarbonetos no estado de São Paulo*. São Jose dos Campos, INPE, RTR/015,1982, 167p.

MATTOS, J.T. de. *Caracterização do comportamento geológico-estrutural na região da Represa de Furnas (MG), com dados de sensoriamento remoto*. Tese de Doutorado em Geociências – Geologia Geral e Aplicada. USP. São Paulo, 1986

MATTOS, J.T.de. Sensoriamento Remoto Aplicado a Mapeamentos Geoambientais. Rio Claro : UNESP. (notas de aula do curso de pós-graduação em Geociências e Meio Ambiente). 2002.

MATTOS, J.T. DE; VENEZIANI, P; SAMPAIO, O. S. Estudos de fraturamentos para pesquisa de água subterrânea no Estado de Sergipe com produtos de

sensoriamento remoto. In: Simpósio Latino Americano de Sensoriamento Remoto; IV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto; VI Reunion Plenária Selper, 1986, Gramado, 1986.

MEZZALIRA, S. *Novas Ocorrências de vegetais fósseis cenozóicos no estado de São Paulo*. IGG, São Paulo, 15:73-91. 1962.

MORAES REGO, L.F. – 1933 – As formações cenozóicas do Estado de São Paulo. *Anais...* Escola politécnica. São Paulo, 2: 231-267.

OLIVEIRA, J.B. de. Solos do Estado de São Paulo: descrição das classes registradas no mapa pedológico. Campinas, Instituto agrônomo, 1999, 112 p. (Boletim científico, 45)

OHARA, T. *Zoneamento Geoambiental da Região do Alto-Médio Paraíba do Sul/SP com Sensoriamento Remoto* – Tese de Doutorado – UNESP – IGCE – Rio Claro, 1995 – 235pg.

RICCOMINI, C. – 1989 – *O Rift continental do Sudeste Brasileiro*. (Tese de doutoramento apresentada ao Instituto de Geociências da USP). São Paulo. 256 p.

RIVEREAU, J.C. Notas de aula do curso de fotointerpretação. Curitiba, Instituto de Geologia/UFPR. 128 p. 1969.

RIVEREAU, J.C. Notas de aula do curso de fotointerpretação. Série Didática. Brasília, Departamento de geociências- UNB, n. 4, 1972, 128p

ROSS, J.L.S. & Moroz, I.C. Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo. São Paulo: USP, v. I e II, 64 p e 2 mapas, escala 1:500.000, 1997

SANTORO, E.; ENS, H. H.; NAGATA, N. Geologia da folhas Jacareí, Tremembé, Taubaté e Pindamonhangaba – SP, parte 1: Embasamento Setentrional da Bacia de Taubaté. *Ata...* SBG/SP-RJ; 2 Simp. Geol. Sudeste. P. 481-489, 1991

SCHOBENHAUS, C. CAMPOS, D. A.; DERZE, G.R.; ASMUS. H. E. (coord.) Geologia do Brasil. Brasília, DNPM, 501p. 1984

SETZER, J. Atlas Climático e Ecológico do Estado de São Paulo. Comissão Interestadual da Bacia Paraná-Uruguai, 1966. 61p

SILVA, A. R. da ; MATTOS, J. T. de . Sensoriamento Remoto para Mapeamentos Geoambientais visando zonas favoráveis a pesquisa de recursos hídricos subterrâneos: Uma abordagem metodológica.. In: XIII SBSR Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2007, Florianópolis - SC. *Anais do XIII SBSR Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Florianópolis - SC : INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2007. v. 1. p. 3585-3592.

SOARES, P. V. ; PEREIRA, S. Y. ; SIMÕES, S. J. C. ; BERNARDES, G. P. ; Barbosa, S.A. . Mapa de Infiltração do Alto e Médio Vale do Paraíba do Sul com base em elementos da paisagem. In: I Seminário de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul: o Eucalipto e o Ciclo Hidrológico, 2007, Taubaté. *Anais... I Seminário de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul: o Eucalipto e o Ciclo Hidrológico*, 2007. p. 83-89.

SOARES, P.C.; FIORI, A.P.; MATTOS, J.T.de A lógica de interpretação de fotografias aéreas convencionais aplicada a imagens de satélite. *Anais... I Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, v. 2. São José dos Campos, CNPq/INPE, 616-618 p. 1978.

SOARES, P.C.; Fiori, A.P. Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. *Notícias Geomorfológicas*, nº 6, V (32) / 1976, p. 71-104.

SOARES, P, C.; LUZ, M. E. R.; REDAELLI, R., GUERRA, S. M. S. Análise morfoestrutural em fotos aéreas: aplicação na prospecção de hidrocarbonetos na Bacia do Paraná. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2, São José dos Campos, 1982. *Anais... II Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, v. 1, 1982. P. 157-168, 1982

SOARES, et al. Análise morfoestrutural integrada em imagens de radar e Landsat na Bacia do Paraná – Relatório RT 041/81. PAULIPETRO, 1981.

SUGUIO, K. (1968) *Contribuição à Geologia da Bacia de Taubaté* (Tese de doutorado apresentada à Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da USP) São Paulo. 106 p.

VALENTE, C. R.; OLIVEIRA, S. M. A. de.; Veneziani, P. Controle neotectônico das águas subterrâneas no Estado do Rio de Janeiro In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 10, 2001, Foz do Iguaçu. *Anais... X Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, v. 1, 2001. P. 367-373.

VENEZIANI, P; ANJOS, C. E. Metodologia de interpretação de dados de sensoriamento remoto e aplicações em geologia. São José dos Campos : INPE, 1982. 54p. (INPE 2227).

VESPUCCI, J.B.O.- 1984- *Sistemas deposicionais e evolução tectono-sedimentar da Bacia de Taubaté – SP.* (Dissertação de mestrado apresentada ao instituto de Geociências da USP) São Paulo. 98 p.

WASHBURNE, C. W. – 1930 – Petroleum geology of state of São Paulo. *Bol. Com. Geogr. Geol.* Est. São Paulo. 22: 282 p.

## **Anexos**

Fichas de Campo dos 19 pontos de coleta de dados.

## FICHA DE CAMPO

**Local** Rodovia Taubaté – Ubatuba

**Ponto 01**      **GPS**      Latitude      444602  
 Longitude      7446278  
 Altitude      712m

**Vegetação** Arbórea grande porte

**Relevo** Mar de Morros  
 Côncavo / côncavo – retilíneo – convexo

**Litotipos** - Rocha quartzo, feldspática, cataclasada com foliação cataclástica (sigmoidal) com presença de material xistoso  
 - Dobramento isoclinal deitado  
 - Dobras de arrasto  
**extrato e foliação:** cataclástica 312/27 NE

**Extensão do Afloramento** 100 x 8 m

### Medidas Estruturais

Nº	Atitude	Discretas	Serie	Sistema	Sistema Conj	Aberta	Fechada	Espaç//	Preench//	OBS
	93/84NE									Plano de falha inversa
1	30/82NW			✓	✓	✓	✓ Óxido Mn			
2	150/vert		✓	✓	✓			10 - 20cm		
3	260/83NW		✓	✓	✓	✓	✓	15 cm	✓	
4	85/55NW		✓	✓	1 - 2			40 - 60cm		















## FICHA DE CAMPO

**Local**

Tamoios. Ponte Pousada Iguatiba

**Ponto 09**

**GPS**  
 Latitude 442265  
 Longitude 7400869  
 Altitude 736m

**Vegetação**

Mata Atlântica secundária removida

**Relevo**

Côncavo - retilíneo - convexo

**Litotipos**

Migmatito cataclasado, paleosoma equivalente ao neossoma, não alterado.

**extrato e foliação:** 87/70 SE cataclástica com estruturas sigmóides estiradas 250/72 SE (outro lado da rodovia)

**Extensão do Afloramento** 120 x 6 m

**Medidas Estruturais**

Nº	Atitude	Discretas	Serie	Sist.	Sistema Conj	Aberta	Fechada	Espaç//	Preench//	OBS
1	70/70SE		✓	✓		✓		mm 2cm	Não	
2	275/60NE		✓	✓	1	✓		mm 20cm	Não	
3	160/67NE		✓	✓	1 - 2	✓		mm 3cm	Não	
4	110/20SW		✓	✓	1 - 2 - 3	✓		mm 7cm	Não	
5	195/85SE			✓	1-2-3-4	✓			Não	
6	215/40SE			✓	1-2-3-4-5		✓			
7	255/75NW			✓	?		✓			
8	200/8									Eixo de dobra
9	245/35									Flexural concêntrica



## FICHA DE CAMPO

**Local**

Estrada Paraibuna - Jambeiro. Limite de município

**Ponto 11**

**GPS** Latitude 427125  
Longitude 7419090  
Altitude 755m

**Vegetação**

Mata Atlântica removida, arbórea médio porte (bambu e gramíneas)

**Relevo**

Convexo

**Litotipos**

Quartzo muscovita xisto, com núcleo migmatítico  
**extrato e foliação: 260/55 SW Foliação cataclástica (crenulações)**

**Extensão do Afloramento** 110 x 8 m

**Medidas Estruturais**

Nº	Atitude	Discretas	Serie	Sist.	Sistema Conj	Aberta	Fechada	Espaç//	Preench//	OBS
1	175/S.V.		✓			✓		mm 4cm	Não	
2	NS/80W		✓	✓		✓		mm 5-20cm	Sim Zeolita	2
3	165/25SW		✓	✓	?	✓		mm 2cm	Não	
2	350/85SW		✓	✓		✓		mm 5-20cm	Sim Zeolita	Diedro 2
4	95/40SW			✓	2		✓			Diedro 2
5	173/35SW		✓	✓	2		?	mm 20cm		
6	80/60SE		✓	✓	2	✓		mm 3cm	Não	2-6 Diedro
7	280/55NE		✓	✓			✓	mm 2cm	Não	

8	245/65NW		✓	✓		✓		1cm 10cm	Quartzo	Diedro 2
9	165/S.V.		✓	✓	8		✓	mm 2cm		Diedro 2
10	40/25SW		✓	✓	8-9	✓		1cm 5- 10cm	Quartzo	Diedro 2
11	165/20SW									Super- fície de Charri- age
12	100/15SW			✓		✓			Quartzo	Diedro
13	170/83NE			✓	12	✓			Não	Diedro
14	250/85NW				12-13					Folia- ção Cata- clástica
15	320/85SW		✓	✓	12-13- 14	✓		mm 10cm	Areno Argiloso	















