

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA  
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO HIDROGEOLÓGICO DA PORÇÃO OESTE  
DO CIRCUITO DAS ÁGUAS, SUL DE MINAS GERAIS, ATRAVÉS DE  
TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO**

Submetida por Flávia Maria de Fátima Nascimento  
Orientador: Dr. Célio Eustáquio dos Anjos

Em cumprimento final aos requisitos à obtenção do título de  
Mestre em Sensoriamento Remoto

INPE  
São José dos Campos  
Março de 1995

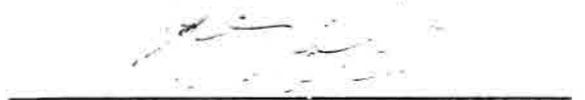
Aprovada pela Banca Examinadora  
em cumprimento a requisito exigido  
para a obtenção do Título de Mestre  
em Sensoriamento Remoto

Dr. Célio Eustáquio dos Anjos



Orientador/Presidente

Dr. Edison Crepani



Membro da Banca

Dr. Juércio Tavares de Mattos



Membro da Banca

Dr. Paulo Veneziani



Membro da Banca

Dr. José Antonio Teixeira



Membro da Banca  
- Convidado -

Candidata: Flávia Maria de Fátima Nascimento

São José dos Campos, 28 de março de 1995

À minha querida mãe Maria Antônia  
e sobrinhas Gabriela, Erika e Dani

## AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Célio Eustáquio dos Anjos, pela orientação, incentivo e amizade durante a elaboração deste trabalho;

Aos Drs Paulo Veneziani, Juércio Tavares de Mattos, Athos Ribeiro dos Santos e Edson Crepani, pelas críticas, discussões técnicas, incentivo e amizade no decorrer deste trabalho;

À CPRM/BH, pela participação no Projeto Circuito da Águas.

Aos meus queridos pais, irmãos e sobrinhas, os quais, espero que perdoem a minha ausência;

Ao desenhista Joaquim Godoi Filho, pela amizade e capricho dedicado às ilustrações.

Aos funcionários do LTID (Laboratório de Tratamento de Imagens Digitais), especialmente Moacir Godoy Junior e Iris de Marcelhas e Souza, e aos funcionários do DPI (Departamento de Processamento de Imagens), especialmente Silvana Amaral, pela paciência e amizade durante a utilização do SGI (Sistema de Informações Geográficas) e SPRING (Sistema de Processamento de Imagens Georeferenciadas).

Aos funcionários da gráfica, pelos cuidados e amizade durante a elaboração dessa dissertação e também ao motorista Naur Fischer N. Neto pela atenção durante o trabalho de campo.

Ao Gilberto Câmara pelo incentivo para o término dessa dissertação.

Aos amigos pelo incentivo, amizade e distração.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pela infra-estrutura;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de estudos.

## RESUMO

Neste trabalho foram interpretados dados de imagens TM-LANDSAT-5 (escala 1:100.000) e integrados os resultados para identificação de locais favoráveis a exploração de água subterrânea. A área de estudo abrange a porção oeste do Circuito das Águas, sul de Minas Gerais, região situada ao sul do Craton do São Francisco, em unidades Pré-cambrianas do Nappe Socorro-Guaxupé e Faixa Alto Rio Grande. A partir da interpretação dos dados das imagens fotográficas e trabalho de campo, foram confeccionados e analisados diversos mapas temáticos (mapas de traços, isofrequência e eixos de máximos de zonas de juntas, mapas litoestrutural, de lineamentos estruturais, de Condicionantes hidrogeológicos e mapa de unidades de relevo). A análise dos dados estruturais possibilitou identificar as principais direções de fraturamentos rúpteis e dúcteis existentes na região e as áreas onde ocorrem suas maiores concentrações. A análise do mapa de condicionantes hidrogeológicos possibilitou indicar a distribuição de água subterrânea ao longo dos altos e baixos estruturais, bem como os principais fraturamentos regionais que agem como trapas para o armazenamento de água subterrânea. As características do relevo forneceram informações sobre o escoamento superficial na região. Os dados litoestruturais permitiram separar três setores estruturais na área de estudo e obter as principais características dos litotipos em relação ao armazenamento de água subterrânea. A integração dos resultados e sua comparação com dados de poços tubulares permitiram identificar as áreas com alto e moderado a alto potencial para a exploração de água subterrânea na região. E também identificar os principais fatores que influenciam no controle estrutural dos aquíferos minerais de Lambari, Cambuquira e São Lourenço, bem como suas principais áreas de recarga.

## SUMÁRIO

	<u>Pag.</u>
LISTA DE FIGURAS.....	xii
LISTA DE TABELAS.....	xiv
<u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</u> .....	1
1.1 - Apresentação.....	1
1.2 - Objetivos.....	2
1.2.1 - Geral.....	2
1.2.2 - Específicos.....	2
1.3 - Localização e acessos.....	3
1.4 - Aspectos Fisiográficos.....	5
1.4.1 - Clima.....	5
1.4.2 - Vegetação.....	5
1.4.3 - Hidrografia.....	6
1.4.4 - Estâncias hidrominerais.....	7
<u>CAPÍTULO 2 - GEOLOGIA REGIONAL</u> .....	13
2.1 - Aspectos gerais.....	13
2.2 - Trabalhos anteriores.....	15
<u>CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS</u> .....	21
3.1 - Materiais.....	21
3.1.1 - Produtos TM-Landsat-5.....	21
3.1.2 - Bases topográficas.....	22
3.1.3 - Mapas geológicos.....	22
3.2 - Métodos.....	23
3.2.1 - Seleção dos produtos de sensoriamento remoto.....	25
3.2.2 - Método de fotointerpretação.....	26
3.2.3 - Mapa de drenagens.....	27
3.2.4 - Mapa de lineamentos estruturais.....	27
3.2.5 - Mapa de traços de zonas de juntas.....	29
3.2.6 - Trabalho de campo.....	31
3.2.7 - Tratamento estatístico.....	32
3.2.8 - Mapa de isofrequência de zonas de juntas.....	33
3.2.9 - Mapa de eixos de máximos de zonas de juntas.....	34
3.2.10- Mapa de condicionantes hidrogeológicos.....	34

3.2.11 - Mapa litoestrutural.....	36
3.2.12 - Modelos de deformação.....	37
3.2.13 - Mapa de unidades de relevo.....	45
3.2.14 - Integração dos dados.....	45
3.2.15 -Dados de Poços Tubulares.....	45
<b><u>CAPÍTULO 4 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</u></b> .....	<b>46</b>
4.1 - Mapa de Lineamentos Estruturais.....	46
4.2 - Mapa de Frequência de zonas de juntas.....	56
4.3 - Mapa de eixos de máximos de zonas de juntas.....	57
4.4 - Mapa de condicionantes hidrogeológicos.....	58
4.5 - Mapa litoestrutural.....	70
4.5.1 - Setor norte.....	72
4.5.2 - Setor central.....	75
4.5.3 - Setor sul.....	78
4.6 - Correlação entre as estruturas e modelos de deformação.....	82
4.7 - Mapa de unidades de relevo.....	86
4.7.1 - Relevo com declividade de 0-5%.....	87
4.7.2 - Relevo com declividade de 5-10%.....	87
4.7.3 - Relevo com declividade de 10-20%.....	87
4.7.4 - Relevo com declividade de 20-40%.....	88
4.7.5 - Relevo com declividade de >40%.....	88
4.8 - Integração dos dados.....	95
4.9 - Dados de poços tubulares.....	103
<b><u>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES</u></b> .....	<b>105</b>
Referências Bibliográficas.....	108

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
1.1 - Mapa de Localização da área de estudo .....	04
2.1 - Localização regional da área de estudo no contexto geológico.....	14
2.2 - Mapa Estrutural simplificado da Cunha Guaxupé.....	19
3.1 - Fluxograma de trabalho.....	24
3.2 - Exemplos de propriedade das feições lineares de drenagem e relevo....	28
3.3 - Linhas de contorno estrutural não cotadas.....	35
3.4 - Zona de cisalhamento transcorrente.....	38
3.5 - Zona de cisalhamento dúctil a rúptil.....	32
3.6 - Modelos de deformação por cisalhamento simples.....	43
3.7 - Modelos de deformação por cisalhamento puro.....	43
4.1 - Mapa de lineamentos estruturais.....	49
4.2 - Falha com direção N-S cortando dobra isoclinal.....	50
4.3 - Falhas transcorrentes destrais E-W.....	51
4.4 - Dobras de arrasto mostrando arrasto em fraturas N65-70E.....	52
4.5 - Falhas inversas/ de empurrões e direcionais destrais.....	52
4.6 - Lente de cisalhamento com direção N45-50E e N65-70E.....	53
4.7 - Falhas inversas/de empurrões com componentes direcionais destrais...	54
4.8 - Mapa de traços de zonas de juntas.....	59
4.9 - Roseta indicando direção principal de zonas de juntas.....	60
4.10 - Mapa de curvas de isofrequência de zonas de juntas.....	61
4.11 - Curvas de isofrequência de zonas de juntas para a direção N0-5E.....	62
4.12 - Curvas de isofrequência de zonas de juntas para a direção N45-50E....	63
4.13 - Curvas de isofrequência de zonas de juntas para a direção N65-70E....	64
4.14 - Curvas de isofrequência de zonas de juntas para a direção N85-90E....	65
4.15 - Curvas de isofrequência de zonas de juntas para a direção N35-40W...	66
4.16 - Curvas de isofrequência de zonas de juntas para a direção N65-70W..	67
4.17 - Mapa de eixos de máximos de zonas de zonas de juntas.....	68
4.18 - Mapa de condicionantes hidrogeológicos.....	69
4.19 - Mapa litoestrutural.....	71
4.20- Divisão por setores estruturais.....	73
4.21 - Direção principal de lineação mineral.....	74
4.22 - Direção principal de foliação milonítica no setor norte.....	75
4.23 - Dobra de arrasto com eixo subparalelo à foliação milonítica.....	75
4.24 - Frequência de juntas no setor norte.....	76
4.25 - Foliação milonítica no setor central.....	78
4.26 - Foliação milonítica vertical com direção N70-80E.....	78
4.27 - Dobra com eixo vertical.....	79
4.28 - Direção preferencial de juntas no setor central.....	79
4.29 - Foliação milonítica no setor sul.....	81
4.30 - foliação milonítica com rotação de minerais.....	81
4.31 - Direção de juntas no setor sul.....	82
4.32 - Feições de arrasto sinistral.....	85

4.33 - Mapa de unidades de relevo.....	89
4.34 - Vista da planície Rio Verde e relevo côncavo-convexo.....	90
4.35 - Vista de morros alongados vcom vertentes suaves.....	91
4.36 - Relevo de morros alongados e côcavo-retilíneo-convexos.....	92
4.37 - Planície do Rio Lambari e serrotes.....	93
4.38 - Plano de falha inversa compondo a Serra da Pedra Branca.....	94
4.39 - Escarpa de falha inversa e corpo granítico tombado.....	94
4.40 - Mapa de áreas para exploração e recarga de água subterrânea.....	100

## LISTA DE TABELAS

1.1 - Principais características físico-químicas das fontes de Lambari.....	10
1.2 - Principais características físico-químicas das fontes de Cambuquira.....	11
1.3 - Principais características físico-químicas das fontes de São Lourenço.....	12
3.1 - Faixas espectrais das bandas do TM-Landsat-5.....	21
3.2 - Principais características dos produtos TM utilizados.....	22
4.1 - Unidades litoestruturais identificadas pelo método fotointerpretativo.....	72
4.2 - Integração e classificação de áreas favoráveis à prospeção subterrânea..	98

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

#### 1.1 - APRESENTAÇÃO

Até meados da década de 70, vários estudos utilizando fotografias aéreas verticais, relacionavam falhas e juntas a vazões de poços, apontando uma relação favorável entre as altas vazões e os poços localizados sobre estas estruturas e suas interconexões.

Com o constante crescimento das áreas de concentração humana e o consequente aumento do consumo de água, tornou-se cada vez mais importante a busca de novas e modernas técnicas de exploração e preservação de água subterrânea em meios fraturados.

A partir do final da década de 70, incrementaram-se as técnicas de sensoriamento remoto aplicadas à pesquisa hidrogeológica e os estudos passaram a relacionar medidas de densidade e frequência de fraturamentos, bem como o arcabouço geológico para a definição de áreas favoráveis à exploração de água subterrânea.

Neste trabalho, realizado nos terrenos Pré-cambrianos da porção oeste do Circuito das Águas, MG, foram utilizadas técnicas de sensoriamento remoto, com o emprego de Imagens TM-Landsat-5, para análise e interpretação regional de dados referentes a fraturamentos (zonas de juntas e falhas), litotipos, morfoestruturas, relevo, bem como a integração destes dados, visando contribuir para o conhecimento hidrogeológico da região.

## 1.2 - OBJETIVOS

### 1.2.1 - GERAL

Utilizar imagens TM-Landsat-5 para análise de fraturamentos (falhas e zonas de juntas), litotipos, morfoestruturas e relevo, bem como integrar os resultados obtidos com dados de poços tubulares, visando contribuir para o conhecimento regional dos sistemas aquíferos da região oeste do Circuito das Águas, sul de Minas Gerais.

### 1.2.2 - ESPECÍFICOS

1) Elaborar e analisar mapas temáticos obtidos de imagens orbitais (escala 1:100.000) abordando informações sobre os seguintes aspectos:

a) Classificar, quantificar e analisar os fraturamentos por meio da confecção de mapas: de traços, isofreqüência e eixos de máximos de zonas de juntas e mapa de lineamentos estruturais;

b) Caracterizar as unidades litoestruturais e de relevo obtidos pela confecção de mapas litoestrutural e de unidades relevo;

c) Determinar as estruturas (falhas e zonas de juntas) favoráveis ao armazenamento de água subterrânea, pela confecção do mapa de condicionantes hidrogeológicos.

2) Integrar os resultados dos mapas temáticos com dados de poços tubulares, visando contribuir para o conhecimento dos sistemas aquíferos existentes na região, além de buscar correlações litoestruturais entre os resultados obtidos e as estâncias hidrominerais de São Lourenço, Cambuquira e Lambari.

### 1.3 - LOCALIZAÇÃO E ACESSOS

A área de estudo localiza-se no sul do estado de Minas Gerais, abrangendo os municípios de Campanha, Cambuquira, Conceição do Rio Verde, Lambari, Olímpio Noronha, Carmo de Minas, Soledade de Minas, São Lourenço, Pedralva, Cristina e Conceição da Pedra. Delimita-se pelos paralelos 21°45' e 22°15' de latitude Sul e pelos meridianos 45°00' e 45°30' de longitude Oeste, compreendendo uma área total de aproximadamente 2.800 km<sup>2</sup> (Fig.1.1).

Esta região apresenta uma boa rede de rodovias federais, possuindo dois importantes eixos: Br-383 e Br-267. A primeira, no sentido NE-SW, liga a região ao Vale do Paraíba, SP (BR-116); a segunda, no sentido NW-SE, encontra-se com a BR-381 (BH-SP) ligando a região à Zona da Mata. A Br-460 interliga as estâncias hidrominerais de São Lourenço, Lambari e Cambuquira.

As demais rodovias, quase sempre municipais e sem pavimentação, apresentam condições de tráfego bastante limitadas.

A Rede Ferroviária Federal S.A. (R.F.F.S.A) possui uma linha que une as macroregiões de Varginha à Itajubá e à Cruzeiro (SP). Esta linha corta a área de estudo de norte a sul, passando pelo município de Conceição do Rio Verde e ramificando-se próximo a Soledade de Minas, um ramo passa por São Lourenço em direção a Cruzeiro e o outro ramo atravessa Carmo de Minas e Cristina em direção a Itajubá.

Existem dois aeroportos para uso de aviões de pequeno porte: um em Lambari e outro em São Lourenço. Nesta última, com instalações para recebimento de passageiros e abastecimento de combustíveis.

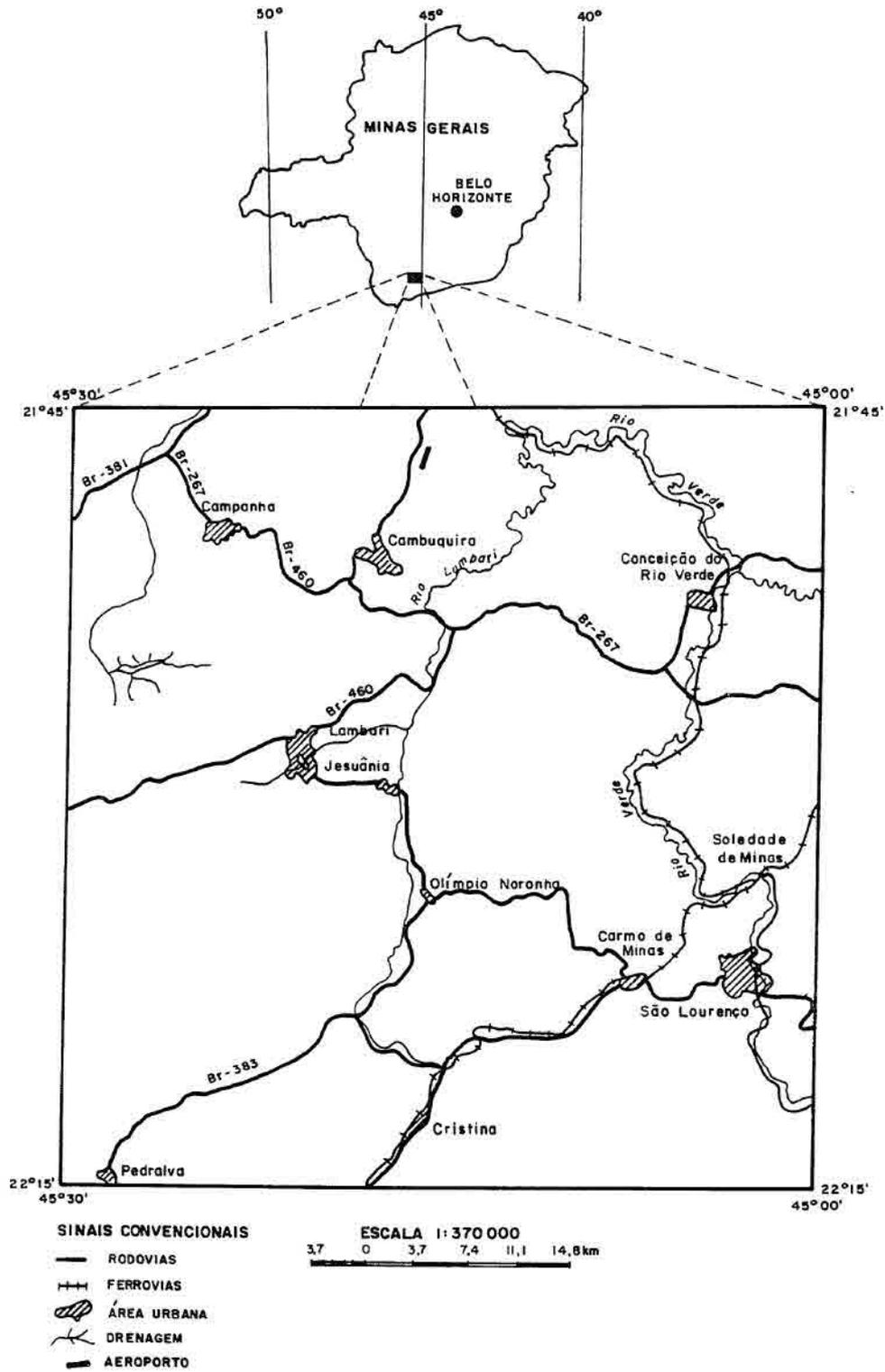


Fig.1.1 - Mapa de localização da área de estudo.

## 1.4 - ASPECTOS FISIAGRÁFICOS

### 1.4.1 - CLIMA

Na área de estudo predomina o clima temperado, de características tropicais a subtropicais, com verão chuvoso e inverno seco.

A temperatura média anual varia entre 18 e 19°C, sendo janeiro o mês mais quente, com temperatura média de 20,5°C e julho o mês mais frio, com temperatura média de 13,4°C (IGA, 1982).

A precipitação pluviométrica anual varia de 1300 mm atingindo valores superiores a 2000 mm, sendo o período mais chuvoso concentrado nos meses de janeiro, fevereiro e dezembro e o período de menor precipitação no mês de julho (IGA, 1982).

### 1.4.2 - VEGETAÇÃO

A cobertura vegetal na região é representada principalmente por campos limpos, campos sujos e savanas, que se constituem, respectivamente, de gramíneas nativas, arbustos e árvores de pequeno porte, além de esparsas matas secundárias e pastagens para exploração agropecuária.

A vegetação de maior porte, constituindo florestas, aparece esparsamente de forma descontínua, principalmente em regiões escarpadas de difícil acesso e também ao longo dos cursos de rios formando matas galerias, indicando outrora exuberante cobertura que existiu nessa região. Essas florestas foram divididas em três tipos: Savana, Floresta Estacional Semidecidual e Savana Floresta Ombrófila (RadamBrasil, 1983).

A cobertura do tipo Savana ocorre sobre as áreas quartzíticas das Serras das Águas e sobre os solos álicos e distróficos do Planalto de Andrelândia (norte da área de estudo) e constitui-se por formação gramínea lenhosa com e sem floresta de galeria.

A Floresta Estacional Semidecidual predomina na área compreendida pelos municípios de Cambuquira e norte de Lambari e caracteriza-se pela ocorrência de espécies como peroba, angico, jequitibá e sapucaia.

A Savana Floresta Ombrófila abrange a maior porção da área, compreendendo a área situada ao sul do município de Lambari, Carmo de Minas e São Lourenço, prolongando-se para o sul de Cristina. Nessa região os interflúvios são ocupados por Savana e os flúvios por Floresta Ombrófila densa.

#### 1.4.3 - HIDROGRAFIA

A área de estudo é drenada principalmente pelo Rio Verde e seus afluentes, Rios Lambari e Baependi, os quais possuem suas nascentes fora da área de estudo.

A nascente do Rio Verde localiza-se em Itanhandú, desenvolvendo-se a sudeste da área de estudo, em direção ao norte. A nascente do Rio Lambari localiza-se ao sul de Cristina e desenvolve-se também em direção norte, onde apresenta sua confluência com o Rio Verde. O Rio Baependi atravessa pequena porção nordeste da área e sua nascente localiza-se em Baependi, sua confluência com o Rio Verde ocorre a norte de Conceição do Rio verde.

A estruturação geológica nesta região impôs aos Rios Verde, Lambari e Baependi, bem como aos tributários destes, padrões de drenagens principalmente do tipo paralelas, com os canais de drenagem de primeira ordem apresentando orientação preferencial para nordeste.

Em relação à localização das estâncias hidrominerais, o Parque das Águas em Cambuquira localiza-se próximo às cabeceiras do Rio Cambuquira, as quais se desenvolvem para norte do Rio Cambuquira. O Lago de Lambari localiza-se entre as

cabeceiras do Rio das Flores e o Córrego da Mumbuca, subafluentes da margem oeste do Rio Lambari. E o Parque das Águas de São Lourenço situa-se próximo a margem oeste do Rio Verde.

#### 1.4.4 - ESTÂNCIAS HIDROMINERAIS

As estâncias hidrominerais carbogasosas da região sul do estado de Minas Gerais destacam-se como uma das importantes riquezas do país em função de suas propriedades medicinais e terapêuticas. Três estâncias estão presentes na área de estudo constituindo os principais centros econômicos da região, Lambari, Cambuquira e São Lourenço.

A mineralização das águas está relacionada a desprendimentos do ácido carbônico, oriundo de poros e cavidades de rochas vulcânicas, que se encontra dissolvido pelas águas circulantes. As águas carregadas de ácido carbônico atacam as rochas nas quais percolam, dissolvendo os elementos mineralizantes ricos em alcalis em proporções variáveis com a temperatura e com a extensão do percurso subterrâneo, concentrando assim os elementos menos solúveis. Este fato explicaria a variedade de propriedades químicas existente nas fontes em regiões limitadas nos três municípios (Andrade Jr., 1942).

Embora algumas informações geológicas tenham sido obtidas apenas para as fontes de São Lourenço, alguns aspectos históricos e propriedades químicas das estâncias hidrominerais serão relatados aqui, devido a importância das águas minerais do sul de Minas datarem do final do século XVIII.

#### ESTÂNCIA HIDROMINERAL DE LAMBARI

As primeiras notícias das águas carbogasosas em Lambari ocorreram em 1780, ficando o local conhecido como Águas Santas e em 1801 como Aldeia de Águas

Virtuosas de Campanha. Em 1930 foi elevada a categoria de município, recebendo o nome do povoado vizinho, hoje, Jesuânia (Mourão, 1992).

O Parque das Águas encerra sete fontes hidrominerais das quais quatro não são captadas. As propriedades das fontes 1, 2 e 3 são praticamente idênticas, ácido-gasosas, e suas principais características físico-químicas são apresentadas na Tabela 1.1.

### ESTÂNCIA HIDROMINERAL DE CAMBUQUIRA

A região de Cambuquira, primeiramente conhecida como Marimbeiro, foi cedida aos escravos alforriados pela Câmara Municipal de Princesa da Campanha. Neste local, os escravos confrontaram-se com um pequeno proprietário alcunhado o "Cambuquira". Em 1872 o povoado foi elevado a distrito com o nome de Águas Virtuosas de Cambuquira, passando em 1925 a ser considerado como município (Mourão, 1992).

Nascem na região seis fontes de águas carbogasosas, das quais, três estão no Parque das Águas de Cambuquira: a Fonte Santa Maria, a qual apresenta três surgências; a Fonte Comendador Augusto Ferreira com maior mineralização e as Fontes Souza Lima e Fernandes Pinheiro, esta última com alto teor de radioatividade, tendo sido ambas classificadas como oligominerais, carbogasosas, alcalinoterrosas e ferruginosas.

As Fontes do Marimbeiro possuem suas emergências a 4km de Cambuquira e possui três fontes de águas alcalinoterrosas, hipergasosas, ferruginosas e fracamente radioativas. A Tabela 1.2 resume as principais características físico-químicas das fontes de Cambuquira.

## ESTÂNCIA HIDROMINERAL DE SÃO LOURENÇO

Durante o Século XVII, "O Pouso do Lourenço" esteve na rota dos Bandeirantes Paulistas que se dirigiam ao Rio das Velhas e Rio Jequitinhonha em busca de Pedras Preciosas e de tropeiros que se deslocavam em direção ao Rio de Janeiro (Mourão, 1992).

Em 1826 foi descoberta uma nascente que posteriormente foi responsável pela denominação da região de "Águas do Viana". Em 1927 foi criado o município de São Lourenço (Mourão, 1992).

Em 1890 foi criada a "Empresa de Águas São Lourenço S.A." e em 1974 seu controle acionário foi transferido para o grupo francês Perrier.

Durante a realização do Projeto para a Captação das Fontes de Águas Minerais de São Lourenço, Andrade Jr. (1942) fez as seguintes observações: "a região do Parque das Águas é constituída por xistos feldspatizados pela intrusão de magma ácido que deu origem ao dique pegmatítico transformando-os em leptinólitos. Estes apresentam-se bastante inclinados, com orientação N20-60E e são frequentemente cortados por apófises de pegmatitos. A água mineral está sempre relacionada com essas apófises, ocorrendo um aumento da vazão, temperatura, mineralização e desprendimento de gases sempre que se cortava uma delas".

No Parque das Águas estão localizadas sete fontes carbogasosas: Fontes Oriente e Andrade Figueira, ambas carbogasosas simples; Fontes Vichi, Primavera e Alcalina, carbogasosas, alcalinoterrosas e ferruginosas; Jaime Solto Maior, similar as demais, porém com maior concentração de hidrogênio sulfurado e a Fonte Brasil, situada em propriedade particular próximo ao parque, foi classificada como carbogasosa, alcalinoterrosa, fluoretada, litinada e sulfurosa.

As principais características físico-químicas dessas fontes são apresentadas na Tabela 1.3.

Tabela 1.1 - Principais características físico-químicas das fontes de Lambari.

FONTE: Mourão (1992), pg. 512.

Fontes	Fonte nº1	Fonte nº2	Fonte nº3
Temperatura (°C)	21	22	19
Radioatividade (Marche)	3,2	2,9	9,7
Vazão (litros/24h)	138.236	28.388	17.280
Gramas/litro CO <sub>2</sub> Total	1,81250	1,71100	1,39250
Cloreto de Sódio	0,00082	0,00147	0,00195
Bicarbonato de Sódio	0,01030	0,00558	0,00668
Bicarbonato de Potássio	0,00815	0,1054	0,01202
Bicarbonato de Cálcio	0,00815	0,02392	0,02549
Bicarbonato de Magnésio	0,1473	0,0179	0,01314
Bicarbonato de Ferro	0,00047	0,00029	0,00029

Tabela 1.2 - Principais características físico-químicas das Fontes de Cambuquira.

FONTE: Adaptada de Mourão (1992), pgs. 503 e 504.

Fontes	Maria	Augusto Ferreira	Fernandes Pinheiro	Souza Lima	Marimbeiro		
					F°1	F°2	F°3
Vazão (l/24h)	5.760	10.800	17.200	3.116	5.855	13.272	14.186
Temperatura (°C)	21,4	21,3	21,2	21,1			
Radioatividade (Mache)	2,9	7,3	43,3	5,8	7,6	6,9	5,5
Índice de Alcalinidade Terrosa	—	---	---	---	20,7	23,8	30,0
(gramas/litro)							
Bicarb. de Sódio	0,00886	0,01551	0,03159	0,01342	0,07507	0,00859	0,10212
Bicarb. de Potássio	0,00279	0,00371	0,01324	0,00910	0,03745	0,04141	0,05063
Bicarb. de Cálcio	0,01156	0,01494	0,06396	0,07491	0,23170	0,26785	0,33884
Bicarb. de Magnésio	0,00552	0,00882	0,02294	0,01196	0,09349	0,10754	0,13291
Bicarb. de Ferro	0,00013	0,00020	0,04112	0,02753	0,001887	0,01891	0,02165
CO <sub>2</sub> total	—	---	---	---	1,90600	2,11500	2,18500

Tabela 1.3 - Principais características físico-químicas das fontes de São Lourenço.

FONTE: Mourão (1992), pg.517.

Fontes	Oriente nº1	Andrade Figueira nº2	Vichi nº3	Primavera nº4	Alcalina nº5	Jaime S. Maior nº6	Brasil
Temperatura (°C)	18,9	17,8	17,5	18,4	---	---	23
Radiotividade (Mache)	17,1	2,0	1,3	0,9	---	---	0,74
Em gramas/litro CO <sub>2</sub> Total	1,27500	1,47300	1,73100	1,79300	1,16210	1,7642	1,15016
H <sub>2</sub> S	---	---	---	---	---	0,0019	0,01365
Bicarbonato de Sódio	0,5067	,2180	0,35550	0,33650	0,4298	0,3671	0,33176
Bicarbonato de Potássio	0,3393	0,01705	0,29030	0,29320	0,2586	0,2053	0,21310
Bicarbonato de Cálcio	0,04662	0,2705	0,034570	0,34290	0,3490	0,4242	0,26086
Bicarbonato de Magnésio	0,03300	0,01440	0,23340	0,235580	0,2880	0,2454	0,16710
Bicarbonato de Ferro	0,00038	0,00027	0,00223	0,09200	0,0490	0,0178	0,01429

## CAPÍTULO 2

### GEOLOGIA REGIONAL

#### 2.1 - ASPECTOS GERAIS

A área de estudo localiza-se na porção sul do Craton São Francisco, sendo limitada a norte pela Faixa Alto Rio Grande (Hasui, 1982; Hasui e Oliveira, 1984) e a sul por unidades do Nappe Socorro-Guaxupé (Cavalcante et al., 1979) (Fig. 2.1).

O Nappe Socorro-Guaxupé compreende em sua base, rochas granulíticas, migmatíticas e graníticas e no topo migmatitos, gnaisses, anfibolitos, quartzitos, gonditos, mármores, granada-biotita-xistos e intrusões alcalinas. A Faixa Alto Rio Grande é representada por ortognaisses, migmatitos e sequências metassedimentares e metavulcanossedimentares (Campos Neto et al., 1990). O metamorfismo é do tipo Barroviano e aumenta de norte para sul desde a facies xisto verde até a facies anfibolito (Ribeiro et al., 1990).

Este domínio crustal caracteriza-se por sua complexidade histórica, ou seja, neste domínio registram-se metamorfismo e deformações polifásicas que remontam desde o Arqueano extendendo-se até o Brasileiro ou Cambriano.

Esta região tem sido alvo de várias pesquisas desde a década de 50, contando com um considerável acervo de dados geológicos. Neste acervo, diversas terminologias estratigráficas e geotectônicas foram adotadas por vários autores, o que leva a controversas sobre a evolução das faixas marginais ao sul do Craton do São Francisco.

Os terrenos do Nappe Socorro-Guaxupé formam uma cunha, com direção leste-oeste, sobreposta à Faixa Alto Rio Grande Até 1990, o arcabouço estrutural

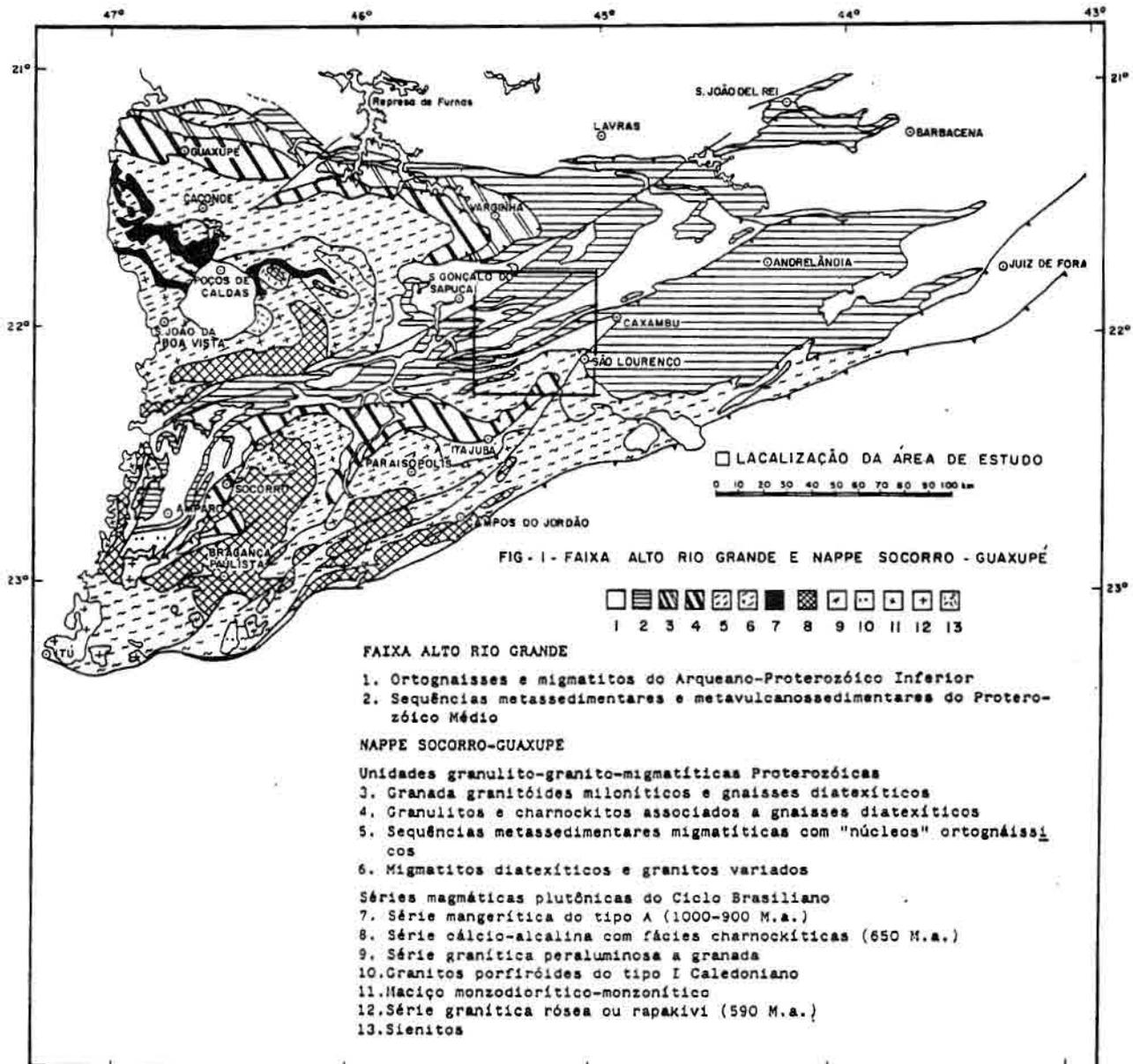


Fig. 2.2 - Localização regional da área de estudo no contexto geológico.

FONTE: Campos Neto et al. (1990), pg. 270.

que envolve a sobreposição dessas megaestruturas foi explicado com base em duas hipóteses: subducção com "napeamento" de porções superiores da litosfera ou junção dos terrenos da crosta por zonas de cisalhamento dúcteis. Estudos mais recentes têm

que envolve a sobreposição dessas megaestruturas foi explicado com base em duas hipóteses: subducção com “napeamento” de porções superiores da litosfera ou junção dos terrenos da crosta por zonas de cisalhamento dúcteis. Estudos mais recentes têm correlacionado a evolução das megaestruturas a modelos tectônicos gerados durante regimes transpressivos, com ênfase em zonas de cisalhamentos dúcteis, as quais seriam responsáveis pela migração de rochas plutônicas de níveis crustais profundos para superiores (Machado e Endo, 1993 e 1994).

## 2.2 - TRABALHOS ANTERIORES

Os primeiros estudos geológicos na região foram realizados por Ebert (1956), o qual postulou um cinturão orogênico de idades Variscana (Geossinclíneo Paraíba) amoldado em torno do Craton São Francisco e bifurcando-se ao sul de Belo Horizonte em dois ramos separando o Maciço de Guaxupé: O Araxaídes e o Paraíbides. O primeiro com direção noroeste contornando o craton entrando em Goiás e o segundo, a nordeste em direção a São Paulo.

Almeida et al. (1976) definiu na região o Maciço de Guaxupé, de idade uruaçuana, localizado a S-SW do Craton do São Francisco. Este maciço seria constituído por rochas granulíticas, anfibolíticas-migmatíticas intrudidas por granitos brasileiros, estando encoberto a oeste por sedimentos da Bacia do Paraná. A faixa envolvendo o maciço é representada pelo Grupo Andrelândia a norte, e Grupo Itapira a sudeste.

Hasui et al. (1978) consideraram o Maciço de Guaxupé como uma unidade maior englobando as unidades uruaçuanas propostas por Almeida (1976), separando faixas brasileiras, limitado a sul pelas faixas São Roque e Apiaí e a norte pela Faixa Brasília.

Almeida (1978) definiu o Craton do Paramirim, constituído por unidades arqueanas estabilizado no Proterozóico Inferior-Arqueano e envolvido por faixas granulíticas e charnokíticas arqueanas dos Cinturões Móveis: Costeiro, Ceres e Alfenas. O Cinturão Alfenas, com bifurcação nas proximidades de Três Corações, foi caracterizado pela presença de inúmeros falhamentos longitudinais, os quais colocaram as rochas das facies anfíbolito e xisto verde do craton em contato brusco com as rochas charnokíticas deste cinturão.

Davino (1979), interpretando dados geofísicos de gravimetria, sugeriu que o limite S-SW do Craton do Paramirim corresponderia a uma zona de colisão ou subducção de placas litosféricas.

Cavalcante et al. (1979) definiram as cunhas tectônicas de Guaxupé e Socorro. A primeira, com deslocamento de leste para oeste, possui seus limites nas zonas de cisalhamento Campo do Meio e Ouro Fino. A segunda, com deslocamento de nordeste para sudeste, é limitada pelas zonas de cisalhamento Ouro Fino e São Paulo.

Wernick et al. (1981) consideraram o Maciço de Guaxupé como um bloco alóctone, arqueano deslocado de oeste para leste por esforços compressivos brasileiros, os quais geraram a zona rúptil dextral Carandaí-Mogiguaçu com direção N60-70E (zona de cisalhamento Ouro Fino de Cavalcante et al., 1979) e a zona rúptil Nova Resende-Barbacena com direção N80W/E-W (zona de cisalhamento Campo do Meio de Cavalcante et al., 1979).

Hasui (1982) e Hasui & Oliveira (1984) definiram a Faixa Alto Rio Grande como um Cinturão Brasileiro englobando os Grupos São João Del Rei e Andrelândia. Hasui (1983) sugeriu que as rochas metamórficas na região, de idade arqueana, teriam sido afetadas por um cinturão de cisalhamento dúctil de baixo ângulo orientado para norte durante o Ciclo Jequié, tendo sido afetadas por outras zonas de cisalhamento no Ciclo Transamazônico.

Soares et al. (1990) descreveram um processo de subducção das placas que continham o Craton do São Francisco e o Bloco Paraná e o associou a duas fases brasileiras de colisão oblíqua com vergência ENE: sincolisionais e tardicolisionais. A primeira fase caracterizou o ápice da convergência, com desenvolvimento de lâminas de cavalgamento para ENE, enquanto na fase subsequente, dominaram transcorrências, empurrões, dobras e falhas NW.

Campos Neto et al. (1990), buscando separar os limites da Faixa Alto Rio Grande e do Maciço de Guaxupé, caracterizaram na região um empilhamento de sistemas deposicionais do tipo alpino, em direção ao craton, estando alojados sob os terrenos da Nappe Socorro-Guaxupé. Os autores sugeriram um processo de subducção do tipo A com subducção da Faixa Alto Rio grande, porém ocorrido no final do Ciclo Brasileiro.

Para Heilbron (1990), nos limites entre a Faixa Ribeira e a Faixa Alto Rio Grande também ocorreria o processo de delaminação e subducção do tipo A, porém, desenvolvidos durante o evento termo-tectônico Uruaçuano, e sendo responsável pelo napeamento das unidades superiores. Neste processo, o Complexo Andrelândia constituiria bloco mergulhante arrastado para SE, para baixo de seu embasamento (Complexos Juiz de Fora e Paraíba do sul).

Segundo Ribeiro et al. (1990), o evento termotectônico uruaçuano foi o responsável por dobramentos e falhas de empurrão com movimentos tectônicos de oeste para leste e de sul para norte, e o evento termotectônico Brasileiro envolveu compressão leste-oeste com geração de falhas direcionais e zonas subverticais de cisalhamento dextral.

Segundo Trouw e Pankurst (1993) a atuação do evento termotectônico uruaçuano não se confirma na região e toda a deformação e metamorfismo devem ser atribuídos aos evento termotectônico brasileiro.

Ebert et al. (1994), analisando as suites calcio-alcálicas, na divisa Minas/São Paulo, afirmaram que apesar da semelhança dessas rochas com produtos de subdução, elas indicam muito mais um material retrabalhado por zonas de cisalhamento durante um regime transpressivo, do que acreção de um arco magmático brasileiro do tipo andino.

Machado e Endo (1993) propuseram a designação de Cinturão de Cisalhamento Atlântico, produto de uma tectônica transpressiva, em substituição as denominações de Faixa e Cinturão Paraíba (Ebert, 1962), Cinturão Ribeira (Hasui et al., 1975), Região de Dobramentos Sudeste (Almeida et al., 1976) e Província Mantiqueira (Almeida e Hasui, 1984). Já, Ebert et al. (1993), sugeriram o termo Cinturão Transpressivo Rio Paraíba do Sul à estruturação NE-SW do sudeste brasileiro.

O arranjo geométrico das zonas de cisalhamento que envolve a Cunha de Guaxupé e o Sistema de Cisalhamento Paraíba do Sul foi atribuído a dois vetores compressivos durante o brasileiro (Machado e Endo, 1994) (Fig.2.3):

a) Vetor E-W, produto de um esforço que originou uma tectônica transpressiva dextral, responsável pela junção dos terrenos da Cunha de Guaxupé aos do Cinturão de Cisalhamento Atlântico e que formou as zonas de cisalhamento direcionais dextrais Ouro Fino, Juiz de Fora-Jaguari-Taxaquara, Além Paraíba-Cubatão-Lancinha, Niterói e a Zona de Cisalhamento Campo do Meio, direcional sinistral;

b) Vetor N-S, produto de um esforço que originou uma tectônica transpressiva sinistral, responsável pelos movimentos contrários reconhecidos nas Zonas de

Cisalhamento Campo do Meio, Juiz de Fora-Jaguari-Taxaquara e Além Paraíba-Cubatão-Lancinha.

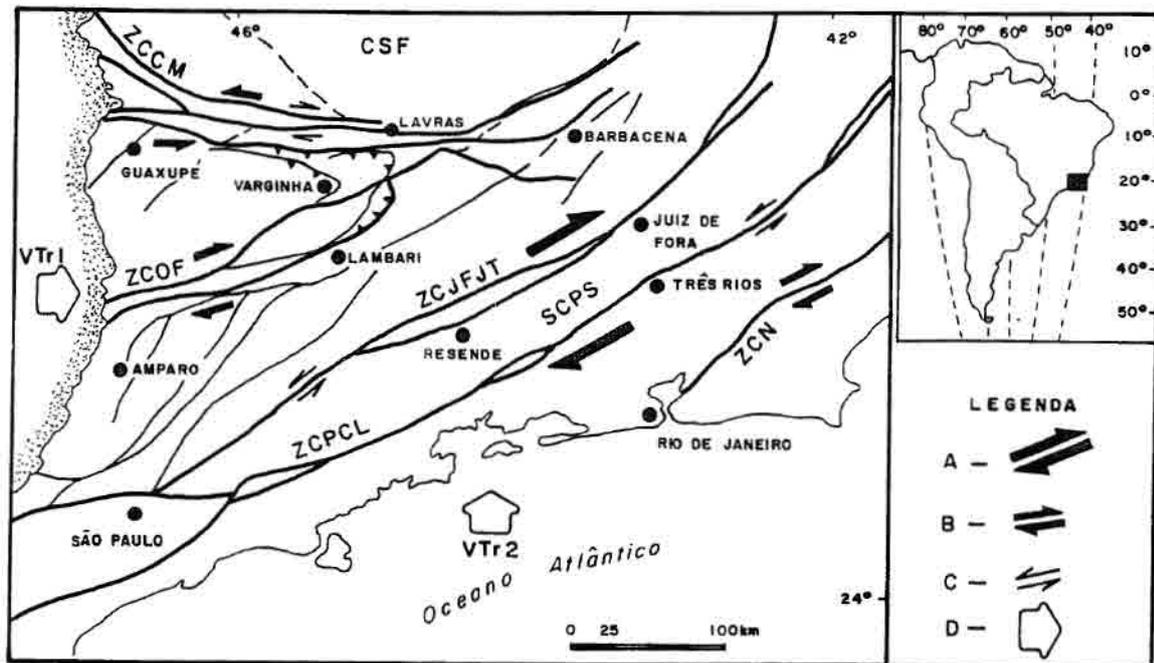


Fig. 2.3 - Mapa estrutural simplificado da Cunha Guaxupé (CG) e da porção central do Cinturão de Cisalhamento Atlântico (CCA). CSF - Craton do São Francisco; SCPS - Sistema de Cisalhamento Paraíba do Sul; ZCJFJT - Zona de Cisalhamento Juiz de Fora-Jaquari-Taxaquara; ZCPCL - Zona de Cisalhamento Além Paraíba-Cubatão-Lancinha; ZCN- Zona de Cisalhamento Niterói; ZCOF - Zona de Cisalhamento Ouro Fino; ZCCM - Zona de Cisalhamento Campo do Meio, A - regime transpressional dextral - estágio 1; B - Zonas com regime transpressional (dextral e ou/sinistral), estágio 2; C - Regime transpressional sinistral, estágio 2; D - vetor transpressivo do estágio 1 - VTr<sub>1</sub> e Vetor transpressivo do estágio 2 - VTr<sub>2</sub>.

FONTE: Machado e Endo (1994), pg. 2624.

Pela síntese acima, observa-se que a partir da década de 80 grandes avanços, apoiados na tectônica colisional, foram obtidos numa tentativa de estabelecer um quadro evolutivo para esta região. Porém, os autores ainda divergem sobre as relações geotectônicas, litoestratigráficas e geocronológicas que envolvem as faixas marginais do Craton do São Francisco. Dificultando assim, o estabelecimento de um quadro evolutivo seguro para a área de estudo.

## CAPÍTULO 3

### MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 - MATERIAIS

Foram utilizados os seguintes materiais e equipamentos:

##### 3.1.1 - PRODUTOS TM-LANDSAT-5

O satélite Landsat-5, colocado em órbita em 1984, possui um sensor TM (Thematic Mapper) de baixa resolução espacial e alta resolução espectral que opera em 7 bandas do espectro eletromagnético abrangendo as faixas do visível, infravermelho próximo, médio e termal, conforme discriminadas na Tabela 4.

Tabela 3.1 - Faixas espectrais das bandas do sensor TM-Landsat-5.

FONTE: Adaptada de Slater (1980), pg. 498.

<b>Banda</b>	<b>Faixa Espectral (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	
<b>1</b>	0.45 - 0.52	Visível
<b>2</b>	0.52 - 0.60	
<b>3</b>	0.63 - 0.69	
<b>4</b>	0.76 - 0.90	Infravermelho Próximo
<b>5</b>	1.55 - 1.75	
<b>7</b>	2.08 - 2.35	Infravermelho médio
<b>6</b>	10.4 - 12.5	Infravermelho termal

O sensor TM (Thematic Mapper) apresenta um elemento de resolução de 30 x 30 m no terreno, exceto para a banda 6, a qual apresenta uma resolução de 120 x 120m. A largura da faixa imageada equivale a 185 km abrangendo uma área total de 34.225 km<sup>2</sup> para cada imagem fotográfica adquirida.

Neste trabalho foram utilizados as imagens orbitais relativas às bandas 4 e 5, órbita 218 ponto 75 de 30/07/92 conforme discriminação na tabela 5.

Tabela 3.2 - Principais características dos Produtos TM/Landsat-5 utilizados.

<b>Produtos</b>	<b>Escala</b>	<b>Banda</b>	<b>Elevação solar</b>	<b>Azimute</b>	<b>Cenas</b>
<b>Imagens</b>	1:100.000	4 e 5	33°	48°	Quadrante D
<b>Transparência positiva</b>	1:1.000.000	4	33°	48°	Cena total (Quadrantes A, B, C, D)

### 3.1.2 - BASES TOPOGRÁFICAS

As cartas topográficas, na escala de 1:50.000 (IBGE, 1971), foram utilizadas como bases planialtimétricas para a obtenção dos dados das imagens TM-Landsat-5. As folhas utilizadas foram: Lambari (SF-23-V-D-VI-3), Conceição do Rio Verde (SF-23-Y-B-III-2), São Lourenço (SF-23-V-D-VI-4) e Cristina (SF-23-Y-B-III-1).

### 3.1.3- MAPAS GEOLÓGICOS

Os seguintes levantamentos geológicos foram empregados como fonte de informações:

- Folha SF.23/24 Rio de Janeiro-Vitória, 1983, escala 1:500.000, do Projeto RADAMBRASIL, vol.32, executado pelo convênio DNPM\CPRM\NUCLEBRÁS\ PETROBRÁS e Ministério das Minas e Energia;

- Atlas Geoeconômico da Microregião do Circuito das Águas, elaborado pelo IGA/MG, 1982, escala 1:175.000;

- Folhas Varginha (SF-23-V-D), anexo V e Guaratinguetá (SF-23-Y-A), anexo VIII, escala 1:250.000, do Projeto Sapucaí, executado pelo DNPM, 1977;

- Mapa geológico do sul do estado de Minas Gerais e regiões adjacentes do estado de São Paulo, escala 1:500.000, Artur (1988), Tese de Doutorado, USP.

#### 3.1.4 - SOFTWARES SGI E SPRING

O SGI (Sistema de Informações Geográficas) é um sistema de processamento que converte as informações analógicas em dados digitais, possibilitando armazenamento e tratamento dos dados, auxiliando em inúmeras aplicações no gerenciamento de recursos naturais. Esta ferramenta permite combinar informações de mapas temáticos, bases cartográficas, dados geoquímicos, geofísicos e imagens de satélite em uma base de dados uniforme e georeferenciada.

O SPRING (Sistema de Processamento de Informações georeferenciadas) é um sistema para geoprocessamento em estações de trabalho UNIX que inclui banco de dados geográficos. Permite adquirir, armazenar, combinar, analisar e recuperar informações codificadas espaciais e não espaciais. Este sistema combina funções de processamento de imagens, análise espacial e modelagem numérica de terreno em um único ambiente interativo.

O Springcarta é um módulo do SPRING para a elaboração da cartografia de mapas temáticos em diversos formatos e escalas.

Este software foi utilizado para a efetuação da cartografia final dos diversos mapas elaborados em formato A4, após a digitalização dos referidos mapas no SGI.

#### 3.2 - MÉTODOS

A metodologia adotada neste trabalho baseou-se numa seqüência sistemática de fotointerpretação cujas etapas são apresentadas na Figura 4.

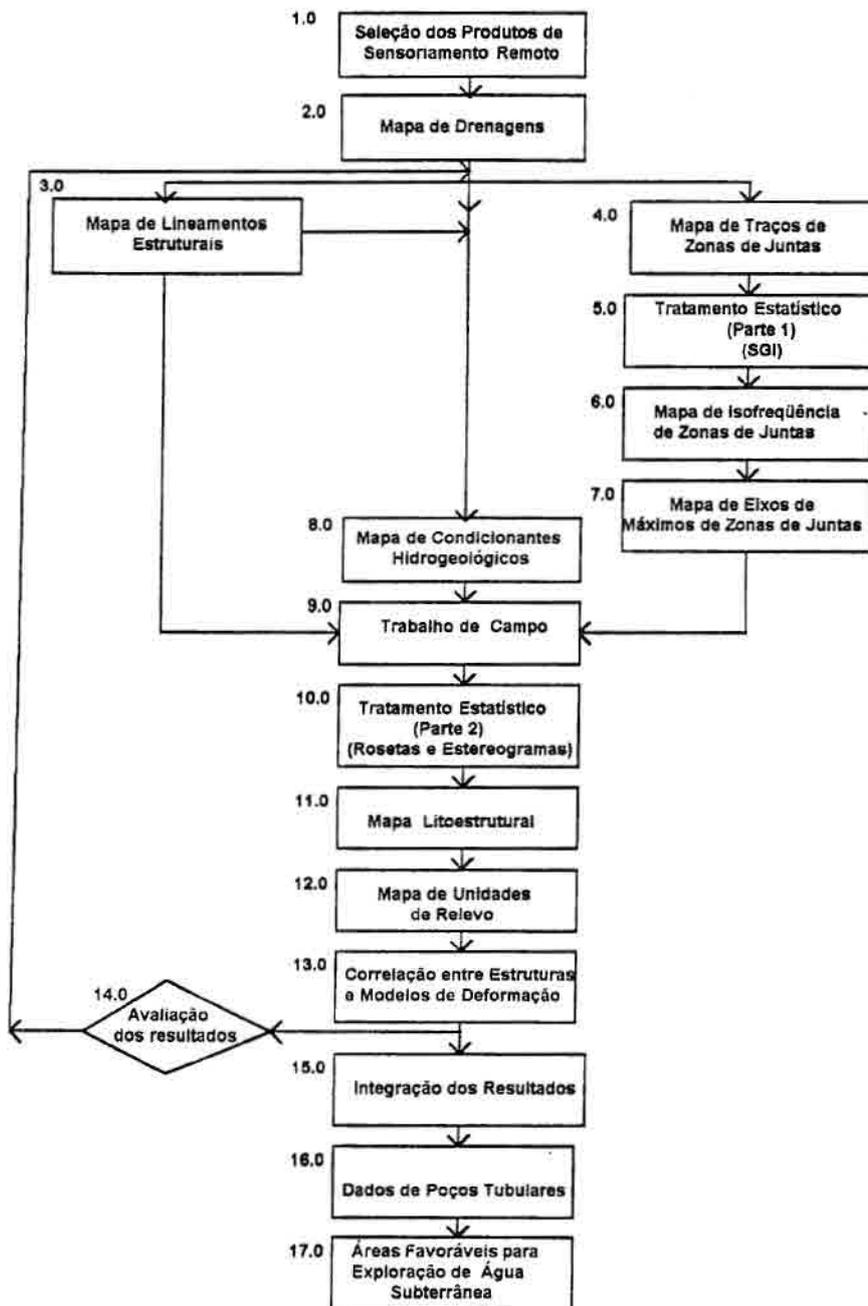


Fig. 3.1 - Fluxograma de trabalho.

### 3.2.1 - SELEÇÃO DOS PRODUTOS DE SENSORIAMENTO REMOTO

Os produtos de sensoriamento remoto utilizados neste trabalho foram selecionados levando em consideração as características que melhor contribuíssem para a identificação e reconhecimento de informações sobre a geologia estrutural, litologia, relevo e hidrografia da área estudada.

Dessa forma, optou-se pelas bandas 4 e 5 (infravermelho próximo) do satélite TM-Landsat-5.

A banda 4 historicamente tem sido utilizada em trabalhos geológicos por permitir uma visão dos alvos e formas da superfície, com menor influência de variações da cobertura vegetal e conseqüentemente com realce da morfologia do terreno.

A banda 5, cuja intensidade de resposta espectral está associada à variações de umidade, proporciona uma boa definição das áreas com maior índice de umidade e de cobertura vegetal. A utilização desta banda auxiliou principalmente na delimitação das áreas urbanas e de aluviões.

Foram ainda consideradas as características relacionadas a variações sazonais que interferem na qualidade da imagem mascarando ou realçando as feições da superfície. As imagens fotográficas obtidas no inverno, ou seja, com ângulo de elevação solar menor que 40° e azimute perpendicular à estruturação principal do relevo, são as mais adequadas para a obtenção de informações geológicas devido ao realce do relevo pelo efeito de sombreamento (Veneziani e Anjos, 1982). No verão este efeito diminui com a maior reflectividade da superfície proporcionada pelo aumento do ângulo de elevação solar. As feições lineares de relevo e drenagem, que possuem a mesma direção que a do azimute solar, geralmente ficam atenuadas na imagem fotográfica.

### 3.2.2 - MÉTODO DE FOTOINTERPRETAÇÃO

A fotointerpretação das imagens orbitais foi realizada utilizando-se a metodologia proposta por Veneziani e Anjos (1982), os quais adaptaram de Guy (1956), Rivereau (1972) e Soares e Fiori (1976) conceitos de abordagem sistemática e lógica de fotointerpretação de fotografias aéreas para produtos orbitais desprovidos de estereoscopia.

Este método envolve três processos (Soares e Fiori, 1976):

a) Fotoleitura: consiste no reconhecimento e identificação dos elementos das imagens com os objetos correspondentes e sua repartição;

b) Fotoanálise: baseia-se no estudo das relações entre as imagens, associação e ordenação das partes das imagens;

c) Fotointerpretação: consiste no estudo da imagem fotográfica visando a descoberta e avaliação por métodos dedutivos, indutivos e comparativos do significado, função e relação dos objetos correspondentes às imagens

A utilização deste método permitiu a análise e interpretação das estruturas geológicas a partir da extração das feições lineares de drenagem e relevo. Estas feições representam as menores superfícies contínuas e homogêneas distinguíveis na imagem pela alternância de pares luz-sombra, ocorrendo de forma retilínea ou curvilínea; e quando interpretadas, podem representar traços de fraturas (zonas de juntas e falhas) e foliações (Veneziani e Anjos, 1982).

As zonas de juntas são representadas por feições lineares de drenagem, que podem ser paralelas, transversais e subparalelas aos traços de foliações. Estes dois

últimos tipos de feições possuem geralmente realce mais acentuado na imagem, enquanto as zonas de juntas paralelas podem representar também traços de foliações.

As falhas são identificadas pela disposição alinhada ou arqueada das feições lineares de drenagem e relevo, devendo apresentar deslocamentos diferenciais ou limites abruptos de zonas homólogas e arrasto de foliações exibido pelas feições lineares de relevo e drenagem.

As unidades litoestruturais são caracterizadas através das zonas homólogas. Estas zonas são áreas contidas dentro de limites onde ocorre a repetição de feições lineares de relevo e drenagem que possuem propriedades semelhantes. Estas propriedades são analisadas a partir das características das feições lineares de relevo e drenagem (simetria, tropia e homogeneidade/uniformidade) e pelas propriedades das formas (densidade, estrutura, grau de estruturação e ordem de estruturação). A Figura 3.2 apresenta alguns exemplos de fotointerpretação utilizando as propriedades das feições lineares de relevo e drenagem.

### 3.2.3 - MAPA DE DRENAGENS

O mapa de drenagens foi elaborado com o auxílio das cartas topográficas na escala 1:50.000, as quais, foram reduzidas para a escala 1:100.000 para a compatibilização do trabalho junto às imagens fotográficas.

A rede de drenagem foi primeiramente extraída das cartas topográficas e transferida para um overlay, o qual foi complementado com os canais de drenagens de primeira e segunda ordem retirados das imagens fotográficas (bandas 4 e 5).

### 3.2.4 - MAPA DE LINEAMENTOS ESTRUTURAIS

O termo lineamento foi definido por Hobbs (1904) como uma feição linear da terra manifestada por cristas ou bordas de áreas elevadas, linhas de drenagem, linhas costeiras, alinhamentos de contatos geológicos ou tipos petrográficos.

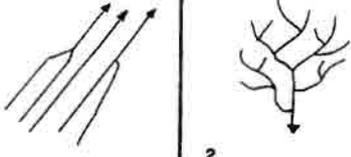
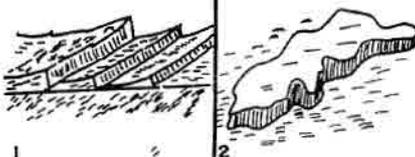
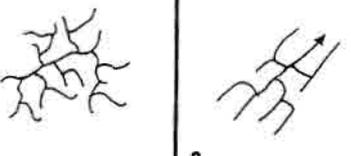
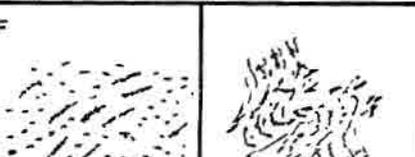
DRENAGEM		RELEVO	
A 		B 	
<b>A- ESTRUTURA</b> 1- Organização linear; 2- Organização em "árvore" (dendrítica).		<b>B-ESTRUTURA</b> 1- Organização em cristas, linear 2- Organização sem formas geométricas definidas.	
C 		D 	
<b>C- GRAU DE ESTRUTURAÇÃO</b> 1- Disposição irregular; 2- Disposição regularmente ordenada forma fortemente estruturada.		<b>D- GRAU DE ESTRUTURAÇÃO</b> 1- Disposição irregular: forma fracamente estruturada 2- Disposição regularmente ordenada: forma fortemente estruturada.	
E 		F 	
<b>E- ORDEM DE ESTRUTURAÇÃO</b> 1- Organização simples: ordem baixa. 2- Organização complexa (treliça recurvado superimposto a dendrítico): ordem alta (fator de condicionamento da forma: antiforma).		<b>F- ORDEM DE ESTRUTURAÇÃO</b> 1- Organização simples: ordem baixa. 2- Organização complexa (deformações plásticas geradas por falhas): ordem alta (fator de condicionamento da forma: falhamento transcorrente).	

Fig. 3.2 - Exemplos de fotointerpretação utilizando as propriedades das feições lineares de relevo e drenagem

FONTE: Veneziani e Anjos (1982), pg. 9.

O'Leary et al. (1976), utilizando fotografias aéreas, descreveram o termo lineamento, como uma feição linear mapeável, simples ou composta, contínua ou descontínua, da superfície terrestre, cujas partes estão alinhadas em um arranjo retilíneo ou ligeiramente curvo e que difere distintamente de feições que lhe são adjacentes, podendo refletir um fenômeno de subsuperfície.

Os lineamentos estruturais, identificados na área, foram associados aos alinhamentos das feições lineares de relevo e drenagem. Estes lineamentos estruturais foram associados a falhamentos, quando se verificou uma das seguintes características:

- a) Deslocamento diferencial de zonas homólogas;
- b) Limite abrupto entre zonas homólogas;
- c) Interrupção e arrasto de feições lineares nas adjacências ao longo de um lineamento.

### 3.2.5 - MAPA DE TRAÇOS DE ZONAS DE JUNTAS

Segundo Hodgson (1961), as juntas podem ser sistemáticas ou assistemáticas. As juntas sistemáticas são paralelas e formam altos ângulos com a base e topo das unidades rochosas nas quais estão presentes. As juntas assistemáticas são curvas no plano observado, apresentam baixos mergulhos e frequentemente terminam nos planos de estratificação.

Plicka (1974) definiu as zonas de juntas sistemáticas como uma concentração de juntas mais ou menos paralelas, com espaçamento de 10 a 30 cm ou mais, verticais a subverticais. Estas zonas de juntas podem se estender por grandes áreas e longas distâncias, separadas entre si por poucos a dezenas de metros e podem formar conjuntos de zonas de juntas quando possuem a mesma orientação. Algumas características relacionadas ao aparecimento de zonas de juntas foram ainda enumeradas por Plicka (1974):

1) As tendências de falhamentos seguem as dos conjuntos de zonas de juntas. Os primeiros podem mudar suas direções abruptamente para encontrar um novo conjunto de disposição oblíqua ao anterior;

2) As zonas de juntas emergem de rochas mais antigas e se estendem verticalmente por rochas mais novas, sobrejacentes;

3) Zonas de juntas indicam tectonismo profundo mesmo em cinturão de “nappes”;

4) As zonas de juntas são visíveis no campo e nas imagens, especialmente nas áreas onde as atividades tectônicas foram incrementadas;

5) As zonas de juntas são indicadas diretamente pelas feições geomórficas, ou seja pelas feições lineares de drenagem;

6) A quantidade de zona de juntas, ou de um sistema particular, aumenta na medida em que diminui a distância de falhas, o que indica tanto associação genética quanto geométrica com o respectivo conjunto de zonas de juntas;

7) As zonas de juntas podem ou não se disporem regularmente em uma área estudada.

A propagação vertical das juntas e conseqüente associação com as falhas do embasamento até sedimentos ou rochas superiores foram demonstrados por vários autores, dentre eles Badgley (1965) e Hobbs et al. (1976).

Badgley (1965) associou os sistemas de juntas à reativações de grandes lineamentos, ou seja, os lineamentos antigos podem condicionar as tendências de juntas formadas durante a reativação.

Hobbs et al. (1976), consideraram que os sistemas de juntas podem não ter relações genéticas diretas com falhamentos, a não ser um certo controle na orientação dos planos dos falhamentos, caso em que as juntas seriam mais antigas que as falhas. Por outro lado, podem estar associadas intimamente, ocorrendo nas vizinhanças dos planos de falhamento e formando um ângulo agudo indicando a direção do movimento relativo.

A análise da tectônica rúptil e rúptil-dúctil por zonas de juntas tem sido demonstrada em vários trabalhos de sensoriamento remoto, dentre eles Anjos (1986), Crepani (1987) e Veneziani (1987). De forma semelhante aos trabalhos citados, para identificação das zonas de juntas na imagem, considerou-se apenas as juntas subverticais a verticais, ou seja, os traços retilíneos de feições lineares de drenagem preferencialmente subparalelos a transversais às foliações.

#### 3.2.6 - TRABALHO DE CAMPO

Durante o trabalho de campo, realizado em uma única etapa, foram visitados 200 afloramentos com o objetivo de confirmar a existência de dados litoestruturais previamente identificados nas imagens fotográficas.

Os lineamentos estruturais foram obtidos primeiramente das imagens fotográficas e suas feições de arrasto, que indicam movimentos relativos de falhas, foram checados, a nível de afloramento, pela análise das estruturas como dobras de arrasto, lineações minerais, marcas de arrancadura, espelho de falhas, estrias e ocorrência de rochas cataclásticas e miloníticas.

As orientações dos traços de zonas de juntas, identificados nas imagens, foram comparadas com as atitudes das juntas obtidas no campo. Estas juntas tiveram suas atitudes amostradas, relações de campo descritas e classificadas a partir de suas seguintes características:

- Atitude de planos de fraturas;
- Tipologia: aberta ou fechada;
- Frequência ao longo do afloramento;
- Presença e tipos de preenchimento.

### 3.2.7 - TRATAMENTO ESTATÍSTICO

O grande volume de dados de estruturas geológicas, obtidos das imagens fotográficas e durante o trabalho de campo, foram analisados estatisticamente em duas etapas.

A primeira etapa constou do tratamento estatístico dos traços de zonas de juntas para a confecção do mapa de isofrequência e mapa de eixos de máximos com a utilização do Programa Analin (Rocio, 1993). Este programa, implementado no SGI/INPE, possibilita manipular digitalmente os dados referentes a fraturamentos (falhas, e zonas de juntas), os quais são considerados como atributos espaciais representados por linhas. Dentre as principais funções neste programa destacam-se os cálculos de frequência (número de traços por célula), densidade (comprimento de traços por célula) e elaboração de rosetas e histogramas.

Na segunda etapa foram tratados os dados estruturais obtidos durante o trabalho de campo como fraturas, foliações e lineações minerais. Nesta etapa foi utilizado o Programa Roshis para determinar a frequência das fraturas (juntas) por direção e o Diagrama Polar Trade para as projeções estereográficas dos demais dados estruturais.

### 3.2.8 - MAPA DE ISOFREQUÊNCIA DE ZONAS DE JUNTAS

O mapa de isofrequência foi elaborado para delimitar as áreas de maior concentração de zonas de juntas considerando o intervalo angular de 0 a 360°.

A seqüência de operações adotada para a confecção deste mapa, utilizando o Programa Analin (Rocio, 1993), apresenta-se resumida a seguir:

- a) Digitalização dos traços de zonas de juntas ou seja, atributos espaciais representados por linhas;
- b) Criação de uma grade retangular para abranger um número adequado de traços, dessa forma, optou-se por células de 2 cm x 2 cm, ou seja células com 4km<sup>2</sup>, totalizando 700 células para o projeto com área de 2800 km<sup>2</sup>;
- c) Contagem do número de zonas de juntas por célula e o valor total atribuído ao ponto central de cada célula;
- d) Transformação da imagem para formato “raster”, ou seja, o valor digital central de cada célula passa a ser referenciado em relação a níveis de cinza;
- e) Fatiamento das áreas em número de classes previamente estabelecido e determinação dos atributos não espaciais (hachuras) para cada classe.
- f) Conversão da imagem raster para vetorial para a suavização de bordas das classes.

### 3.2.9 - MAPA DE EIXOS DE MÁXIMOS DE ZONAS DE JUNTAS

Para a elaboração deste mapa seguiu-se as mesmas etapas empregadas para a obtenção do mapa de isofrequência de traços de zonas de juntas utilizando o programa Analin (Rocio, 1993). Porém, neste mapa as curvas de isofrequência de máximos de zonas de juntas foram obtidas por intervalos angulares pré-estabelecidos. A definição destes intervalos baseou-se nas principais direções dos sistemas de lineamentos estruturais identificados na área.

Os eixos de máximos de zonas de juntas foram obtidos a partir dos eixos maiores das formas elípticas configuradas pelas curvas de isofrequência que apresentaram as maiores concentrações de zonas de juntas.

#### 3.2.10- MAPA DE CONDICIONANTES HIDROGEOLÓGICOS

O mapa de condicionantes hidrogeológicos foi executado a partir do mapa de drenagens e do mapa de lineamentos estruturais.

A execução deste mapa baseou-se na identificação das relações de simetria entre os canais de drenagem consequentes e obsequentes e delineamento das linhas de contorno estrutural não cotadas da área de estudo (Fig. 3.3).

Geralmente, em bacias sedimentares pouco deformadas, cujo tectonismo originou estruturas essencialmente verticais, as formas assimétricas das drenagens indicam a inclinação dos estratos que mergulham no sentido dos afluentes mais longos (drenagens consequentes).

Nas áreas intensamente deformadas onde predominam rochas ígneas e metamórficas que sofreram movimentação vertical e direcional por esforços distensivos, as linhas de contorno estrutural são delimitadas utilizando a simetria da rede de

drenagem em relação aos limites dos blocos. Estes limites representam antigas linhas de fraqueza impostas por fraturamento regionais e que definem eixos de dobramentos flexurais que configuram altos e baixos estruturais.

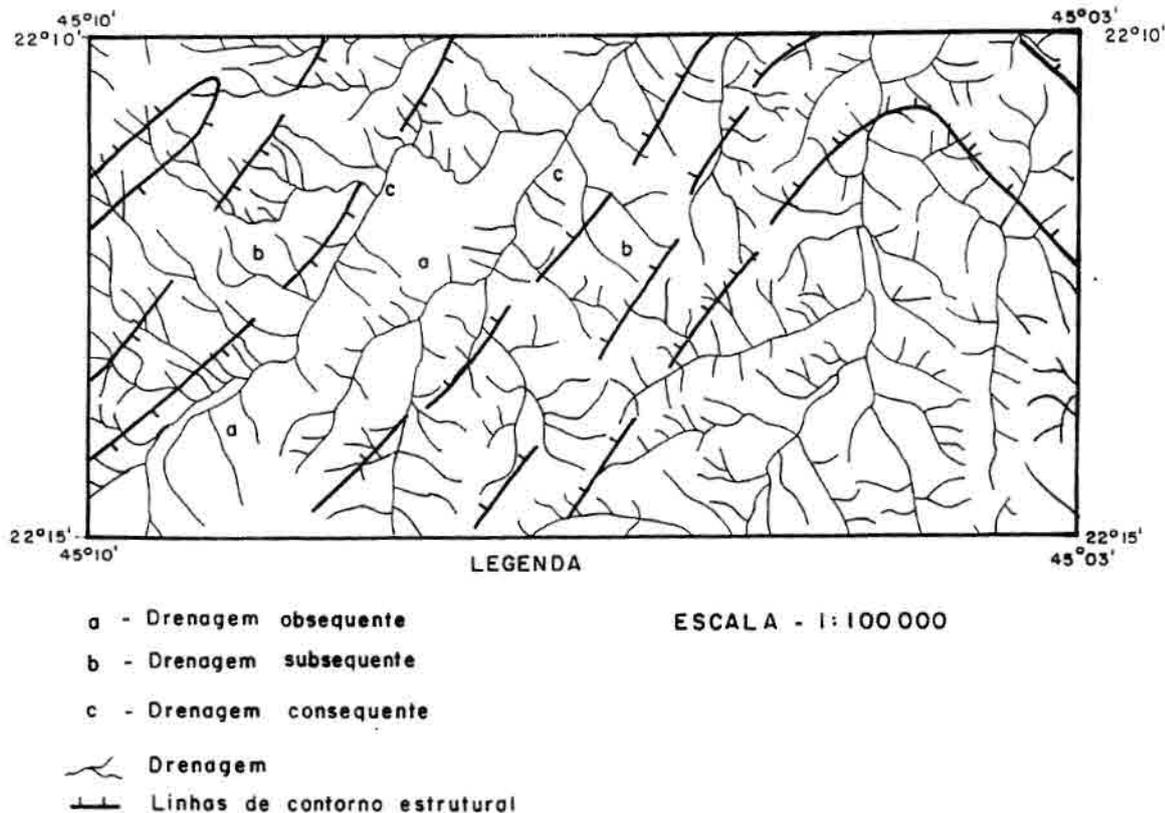


Fig. 3.3 - Linhas de contorno estrutural não cotadas definidas a partir das relações de simetria da rede de drenagem.

A associação dos dobramentos flexurais com movimentos distensivos pode prover informações sobre a distribuição de água subterrânea ao longo dos altos e baixos estruturais e indicar alguns aspectos sobre a distribuição do fluxo de água subterrânea na região. E conseqüentemente determinar a favorabilidade das estruturas ao armazenamento de água subterrânea. (Veneziani et al. 1993).

Dessa forma, na área de estudo onde predominam rochas Pré-cambrianas retrabalhadas por vários eventos deformacionais, para o delineamento das linhas de contorno estrutural foram considerados:

- a) A atitude da foliação milonítica/cataclástica;
- b) A atitude dos lineamentos regionais mais significativos que exercem influência sobre a estruturação geral da área de estudo;
- c) A determinação das principais estruturas (falhas e/ou conjuntos de zonas de juntas) que são favorecidas pelo armazenamento de água subterrânea ao longo dos altos e baixos estruturais na região.

### 3.2.11 - MAPA LITOESTRUTURAL

O mapa litoestrutural foi elaborado considerando:

- a) Os resultados obtidos da análise do mapa de lineamentos estruturais e traços de zonas de juntas;
- b) A interpretação das unidades fotolitológicas, a partir da análise das propriedades das feições lineares de relevo e drenagem e suas formas.
- c) As informações litológicas e estruturais obtidas durante o trabalho de campo; e
- d) A Pesquisa bibliográfica, utilizando principalmente os trabalhos de Cavalcante et al. (1979) e Artur (1988) por apresentarem correlações com as unidades litoestruturais e contatos identificados na área de estudo .

### 3.2.12 - MODELOS DE DEFORMAÇÃO

A orientação e os tipos de deformações (dúctil, rúptil-dúctil e rúptil) bem como os padrões de fraturamentos são obtidos utilizando ensaios de laboratório que permitem simular o comportamento das rochas quando submetidas a esforços dirigidos.

As extensas faixas planares da crosta, nas quais dominam estados de deformação dúctil intensa acompanhados de deformação rúptil nos níveis superiores, são denominadas de cinturões de cisalhamento (Ramsay, 1967). Estas faixas, que podem variar de dezenas a centenas de quilômetros (Tchalenko, 1970), apresentam ramificações, convergências e anastomoses, isolando fatias e lentes menos deformadas.

As zonas de cisalhamento transcorrentes podem estender-se por grandes profundidades e terem registros de reativações em várias épocas. O traçado de uma zona de cisalhamento possui trechos retilíneos e encurvados formando outras zonas de cisalhamento transcorrentes secundárias, onde podem aparecer feições tipo leques embricados, direcionais e duplexes direcionais (Hasui e Batista, 1988) (Fig. 3.4):

a) Nos trechos curvos podem desenvolver-se zonas de cisalhamento transcorrentes, ou de rejeitos oblíquos envolvendo componentes inversas e normais;

b) Nas extremidades desenvolvem-se zonas de cisalhamento secundárias transcorrentes, normais, inversas e com rejeitos oblíquos, nas quais, dependendo do regime transpressivo ou compressivo, podem formar estruturas de ejeção, empurrões e dobras ou bacias de afastamento e falhas normais.

c) Nos trechos planares das zonas de cisalhamento transcorrentes podem ocorrer a formação de duplexes pelas estruturas, P, R, e D (FIG.3.6e);

d) Nas zonas de cisalhamento transcorrentes planares a faixa cataclástica envolve segmentação por fraturas R, R', P, T e Y ou D (Fig. 3.6e).

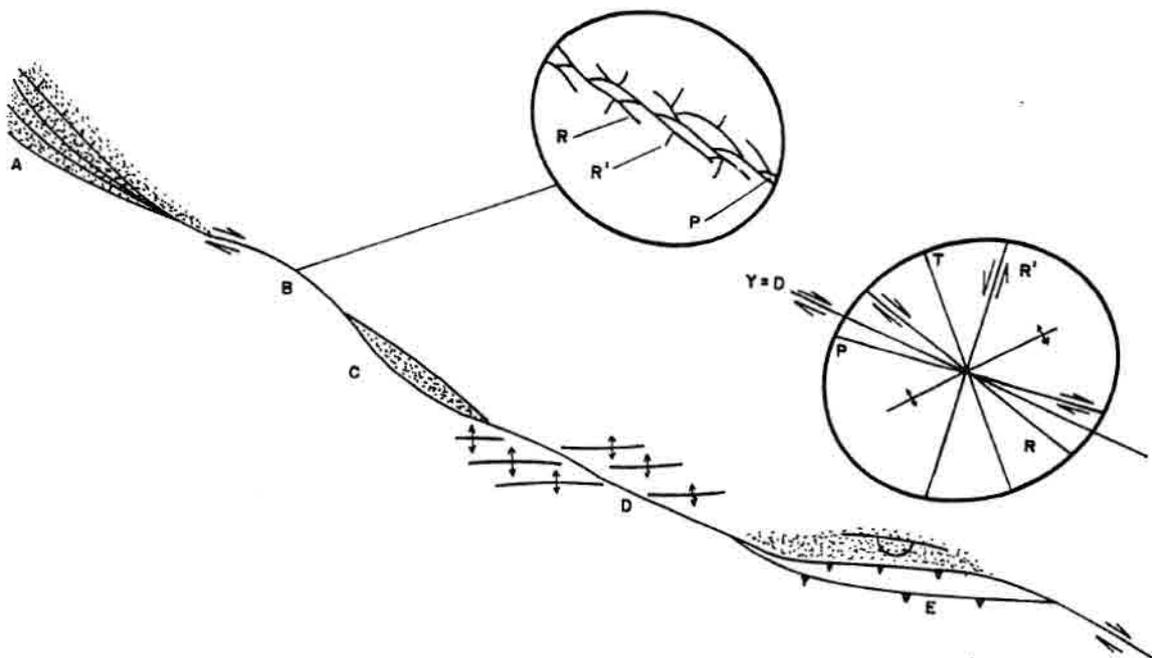


Fig. 3.4 - Zona de cisalhamento transcorrente. Em A) terminação em rabo de cavalo, formando leque embicado direcional e uma zona de sedimentação (pontilhado). Em B) detalhe de falhas R e R' gerando a zona de cisalhamento transcorrente. Em C) arqueamento divergente, com desenvolvimento de duplex direcional distensivo e zona de sedimentação. Em D, dobras. Em E) arqueamento convergente com formação de duplex direcional de contração e elipsóide de deformação.

FONTE: Hasui e Batista (1988), pg. 65.

Nessas zonas de cisalhamento coexistem tanto estruturas geradas por deformação dúctil, dúctil-rúptil e rúptil. Na Figura 3.5 observa-se a transição de uma zona de cisalhamento com deformação dúctil para rúptil durante a atuação de esforços compressivos, a qual apresenta fortes correlações com a estruturação presente na área de estudo.

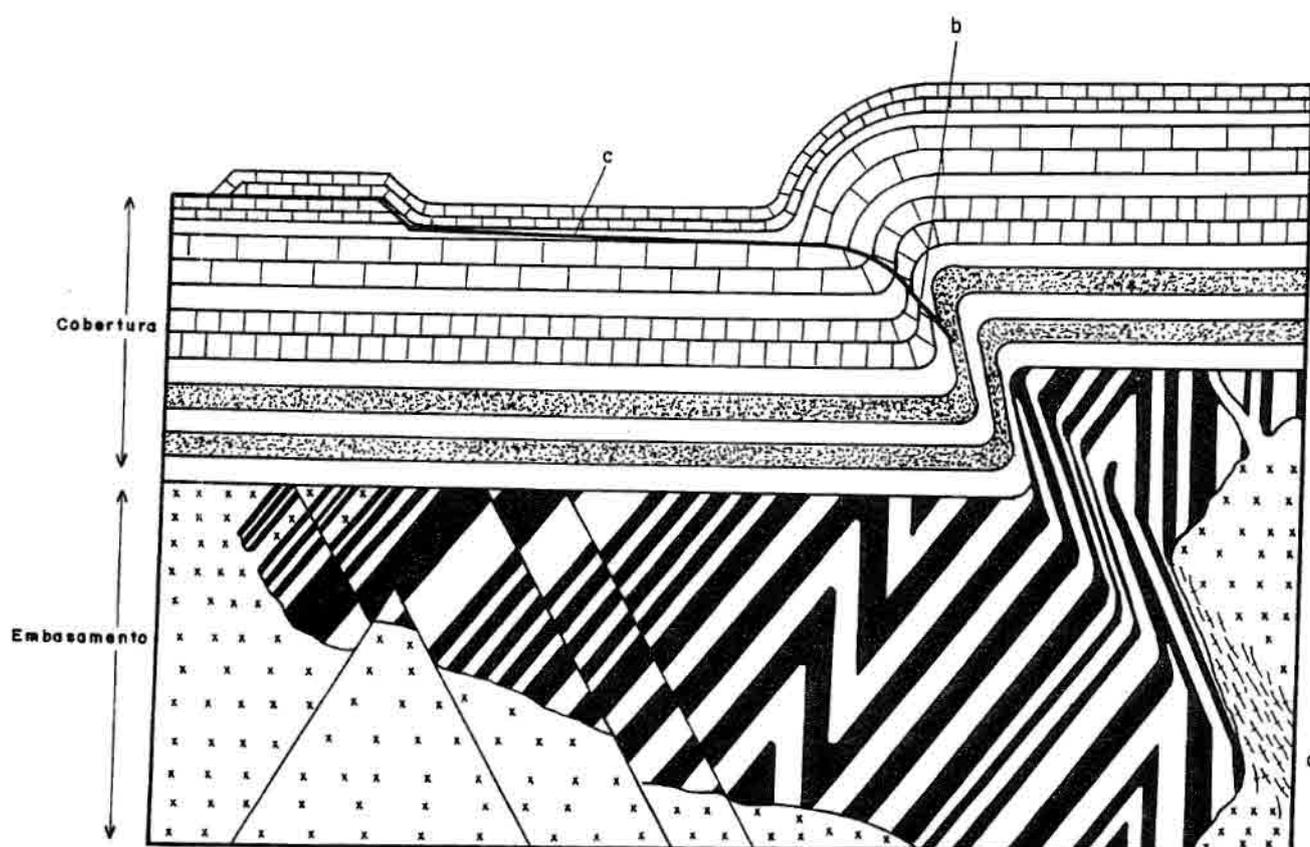


Fig. 3.5 - Aspecto da zona de cisalhamento dúctil em profundidade passando para rúptil nos níveis superiores durante atuação de esforços compressivos. Em a ocorre a predominância das estruturas de fluxo (dúcteis); em b estruturas dúcteis-rúpteis e em c estruturas rúpteis.

FONTE: Ramsay (1987), pg. 616.

Com o tempo, tensão e fluxo térmico, as rochas perdem sua coesão interna na região elástica de deformação dando lugar a comportamentos rúpteis e dúcteis (Ramsay, 1967).

Os materiais rochosos, formados durante regime de deformação dúctil, tendem a fluir quanto submetidos a mecanismos de microcataclase, deslizamentos intracristalinos e intergranulares e difusão. Enquanto os materiais formados durante regimes rúpteis sofrem fragmentação e desenvolvem descontinuidades (Hasui, 1988).

As principais feições que caracterizam a deformação dúctil são: foliação milonítica, dobras de arrasto, feições S-C e lineações minerais e de estiramentos.

Neste trabalho procurou-se enfatizar as estruturas geradas em níveis superiores da crosta, onde predominam as estruturas geradas por deformação rúptil, uma vez que estas são as mais favoráveis à prospecção de água subterrânea.

Vários são os ensaios de deformação que simulam as estruturas rúpteis, presentes nas faixas de cisalhamento, nas quais coexistem tanto estruturas originadas das deformações por cisalhamento simples como por cisalhamento puro.

Riedel (1929) definiu inicialmente as fraturas secundárias R (sintéticas), R' (antitéticas) e T (distensivas) originadas em uma zona de cisalhamento em função de esforços compressivos e distensivos associadas a um binário (Figs. 3.6a e 3.6b). Neste experimento observou-se que as fraturas R desenvolvem-se mais frequentemente que as fraturas R', pois esta última é rotacionada rapidamente durante a progressão do cisalhamento e posteriormente torna-se inativa.

Experimento similar é proposto por Tchalenko (1970), o qual, além de observar o aparecimento das fraturas Riedels, define as fraturas P ("Shears P"), subparalelas à zona de cisalhamento (Fig. 3.6c)

Segundo Wilcox et al. (1973), os sistemas R e R' são verticais. As fraturas R apresentam ângulo de 10 a 30° com a direção principal do falhamento enquanto que as fraturas R', 70° a 90°. Estas fraturas conjugadas apresentam-se ora como juntas, ora como falhas, ou ambas. O ângulo diedro de R e R' seria de 60 a 70° e seu bissetor a direção de compressão máxima.

Harding (1974) associou as estruturas geradas em uma zona de cisalhamento ao elipsóide de deformação por cisalhamento simples (Fig. 3.6d) onde:

a) As dobras escalonadas (“en echelon”) formam-se paralelamente ao eixo maior da elipse com ângulos de  $30 \pm 15^\circ$  em relação à zona de cisalhamento.

b) O par conjugado (R e R') dispõe-se de 10 a 30° em relação à zona de cisalhamento;

c) Falhas de empurrão ou inversas podem desenvolver-se nos flancos das dobras ou entre estes;

d) Surgimento das fraturas P, com 15° a paralelas à zona de cisalhamento.

Sadowski (1983) associou outra fratura ao modelo de Riedel (1929), as fraturas X, simétrica a R' em relação à direção da zona de cisalhamento. As fraturas Y (D) ocorrem paralelamente à direção do cisalhamento principal (Fig.3.6e).

As feições de empurrão ou de falhas de gravidade são comuns às bordas e no interior das zonas de cisalhamento transcorrente, sendo função de irregularidades locais dos blocos ou do regime distensivo ou compressivo associado (Wilcox, 1973).

Nas lentes e blocos separados pelas zonas de transcorrências, sujeitos à deformação por cisalhamento puro, podem também ocorrer os seguintes tipos de fraturas (Loczy e Ladeira, 1976) (Fig. 3.7a):

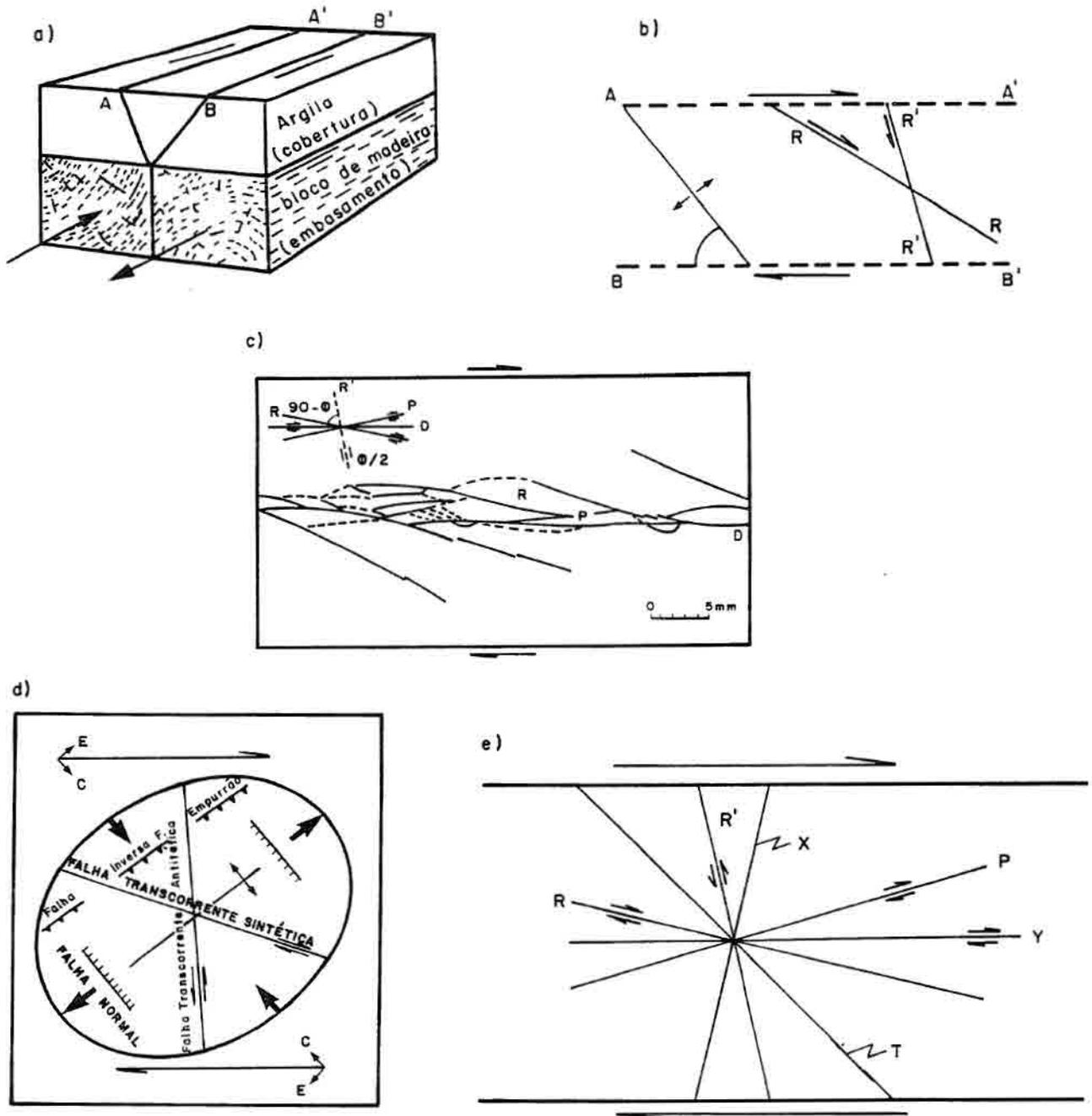


Fig. 3.6 - a) Experimento utilizado por Riedel (1929, pg. 25) simulando deformação e desenvolvimento de falha direcional no embasamento e em b) tipos de fraturas desenvolvidas na superfície da zona de cisalhamento, fraturas Riedels e fratura distensiva.

c) Experimento de Tchalenko (1970, pg. 1628), mostrando os "Riedels", as "Shears P" subparalelas e as fraturas D paralelas à borda da zona de cisalhamento destal;

d) Forças e estruturas geradas em relação ao elipsóide de deformação (Harding, 1974), pg. 1294;

e) Fratura X simétrica a R' e fraturas Y (D) no modelo de zona de cisalhamento destal de Sadowski (1983, pg. 38).

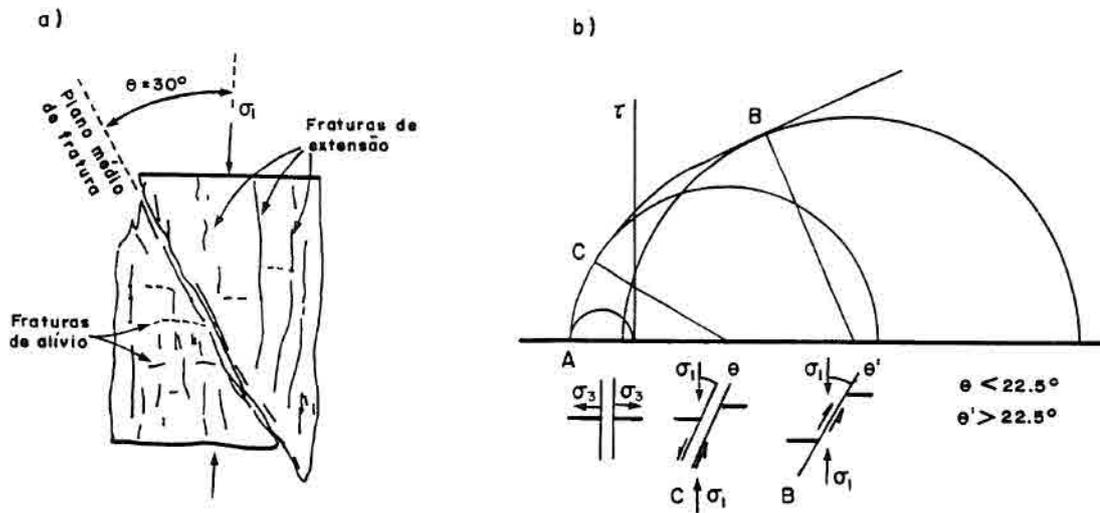


Fig. 3.7 - a) Fraturas de cisalhamento (inclinadas), de alívio (horizontais) e de extensão (verticais).

FONTE: Loczy e Ladeira (1980), pg.20;

b) Circulo de Mohr representando as condições de stress das fraturas distensivas A; Fraturas de cisalhamento B, e Fraturas híbridas C.

FONTE: Price e Cosgrove (1988), pg. 145.

a) Fraturas de extensão - ocorrem conjugadas e formam entre si ângulo de  $60^\circ$ , cuja bissetriz tem a direção do esforço principal ( $\sigma_1$ );

b) Fraturas distensivas - paralelas à direção do esforço principal ( $\sigma_1$ );

c) Fraturas de alívio - normais à direção do esforço principal ( $\sigma_1$ ).

Price e Cosgrove (1990) já consideram a seguinte classificação (Fig.3.7b):

a) Fraturas de cisalhamento - são aquelas que possuem  $\theta > 22^\circ$  com a direção principal do esforço principal ( $\sigma_1$ );

b) Fraturas híbridas - exibem movimentos distensivos e compressivos possuindo ângulos  $\theta < 25^\circ$  com a direção principal do esforço  $\sigma_1$ ;

c) Fraturas distensivas - ocorrem paralelamente à direção principal do esforço ( $\sigma_1$ ).

Em áreas cristalinas a permeabilidade é função principalmente da densidade de sistemas de fraturamentos (falhas e zona de juntas) e da interconecção que possa existir entre eles, tornando ainda essencial se conhecer o caráter distensivo e compressivo dessas estruturas para se estimar o seu potencial de armazenamento e percolação de água subterrânea.

Larsson (1968) associando fraturamentos a dados de poços constatou que:

- As juntas e falhas distensivas fornecem grandes vazões;
- As juntas e falhas trancorrentes são geralmente fechadas fornecendo baixas vazões;
- As juntas e falhas situadas em zona de cataclase ou milonitização fornecem quantidades razoáveis de água.

As fraturas (juntas e falhas) que se interceptam segundo um ângulo próximo a menor que  $60^\circ$ , formando sistemas conjugados, podem revelar próximo aos arredores do ponto de interceção, áreas promissoras ao acúmulo de água subterrânea. As fraturas conjugados quando forma sistemas tendem a compor uma rede de fraturas interligadas favorecendo o aumento da permeabilidade secundária.

Também, os cruzamentos de estruturas distensivas com compressivas e compressivas com compressivas apresentam condições mais favoráveis à ocorrência de

água subterrânea quando comparadas com apenas uma estrutura distensiva individualizada, porém quando esta última não forma “trend”.

### 3.2.13 - MAPA DE UNIDADES DE RELEVO

O mapa de unidades de relevo foi confeccionado utilizando a imagem fotográfica e as bases topográficas na escala 1:50.000. Para essas últimas foi construído um ábaco com as seguintes classes de declividade 0-5%, 5-10%, 10-20%, 20-40% e >40%. Posteriormente, as unidades de relevo delimitadas e suas respectivas classes foram transferidas para uma base 1:100.000, possibilitando assim caracterizar os tipos de relevo existentes na região estudada.

### 3.2.14 - INTEGRAÇÃO DOS DADOS

Os resultados das informações obtidas nos mapas temáticos elaborados (mapa de frequência e eixos de máximos de zonas de juntas, de condicionantes hidrogeológicos, litoestrutural e de unidade de relevo), foram integrados e discutidos a fim de se determinar as áreas mais favoráveis a propecção de água subterrânea. Porém, a determinação de locais onde deverão ser feitas as perfurações de poços tubulares apenas poderão ser estabelecidos após a realização de mapeamentos de detalhe com estudos hidrogeológicos convencionais.

### 3.2.15 - DADOS DE POÇOS TUBULARES

Os dados de poços tubulares foram comparados com os resultados integrados, considerando essencialmente os valores referentes a vazão dos poços tubulares e suas relações com a favorabilidade das áreas de prospeção determinadas na área de estudo.

## CAPÍTULO 4

### DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

#### 4.1 - MAPA DE LINEAMENTOS ESTRUTURAIS

O mapa de lineamentos estruturais, representado na Figura 4.1, foi elaborado a partir da obtenção dos alinhamentos de feições lineares principalmente de drenagem e complementadas com as feições lineares de relevo. Foram identificadas seis direções preferenciais de lineamentos estruturais na área de estudo: N-S, E-W, N45-50E, N35-40W, N65-70E, N65-70W.

Embora estes lineamentos estruturais estendam-se por toda a área de estudo, sua frequência, dimensão, relações temporais e geométricas diferem em função das deformações dos litotipos.

#### SISTEMA N-S

Os lineamentos estruturais com esta direção são pouco expressivos na imagem fotográfica, possivelmente por estarem paralelos com o azimute solar. Eles encontram-se distribuídos em toda a região principalmente na forma de lineamentos poucos extensos, ou seja com até 15 km.

Embora na imagem fotográfica os elementos que indicam deslocamentos direcionais para estes sistemas não sejam evidentes, a nível de campo observou-se que estes sistemas estão associados a falhas direcionais com deslocamentos sinistrais, porém, não se afasta a possibilidade de que alguns destes lineamentos estejam associados também a falhas normais, como observado na Figura 4.2 onde mostra uma falha normal cortando o flanco de dobra de arrasto com eixo vertical.

### SISTEMA E-W

Os lineamentos estruturais com direção E-W apresentam alta densidade na região central da área, principalmente a oeste entre os municípios de Lambari e Olímpio Noronha (Fig.4.1). Apresentam expressivos traçados retilíneos ao longo de extensas e estreitas faixas com espaçamento aproximado de 2km (Fig. 4.3). A estes lineamentos associam-se falhas inversas e falhas direcionais com deslocamentos destrais (Fig. 4.1).

### SISTEMA N65-70E

Os lineamentos estruturais com esta direção apresentam alta expressão em toda a área, principalmente na porção central da área, em uma faixa entre Pedralva e norte de Lambari. Estas estruturas se alinham a estensas escarpas de falhas estando associados à falhas inversas/ de empurrão e falhas direcionais com movimentos destrais.

Ao nível de campo estes movimentos foram observados por dobras de arrasto (Fig. 4.4) e também por feições de arrasto na imagem, como observado a sudoeste de Olímpio Noronha nas unidades gnáissicas miloníticas que compõem a Serra da Pedra Branca e Serra da Barra Grande (Fig. 4.5).

### SISTEMA N45-50E

Compreendem os lineamentos estruturais que ocorrem associados a falhas inversas/ de empurrão e falhas direcionais com predominância de deslocamentos destrais, constituindo as grandes escarpas ao norte-nordeste de Lambari (Serras das Águas, Bocaina, Jurumirim e da Boa Vista).

Estes lineamentos apresentam alta frequência e ocorrem principalmente na região central e sul da área. Estas estruturas conjuntamente com os lineamentos estruturais com direção N65-70E representam as principais direções de lentes de cisalhamento na área de estudo (Fig. 4.6).

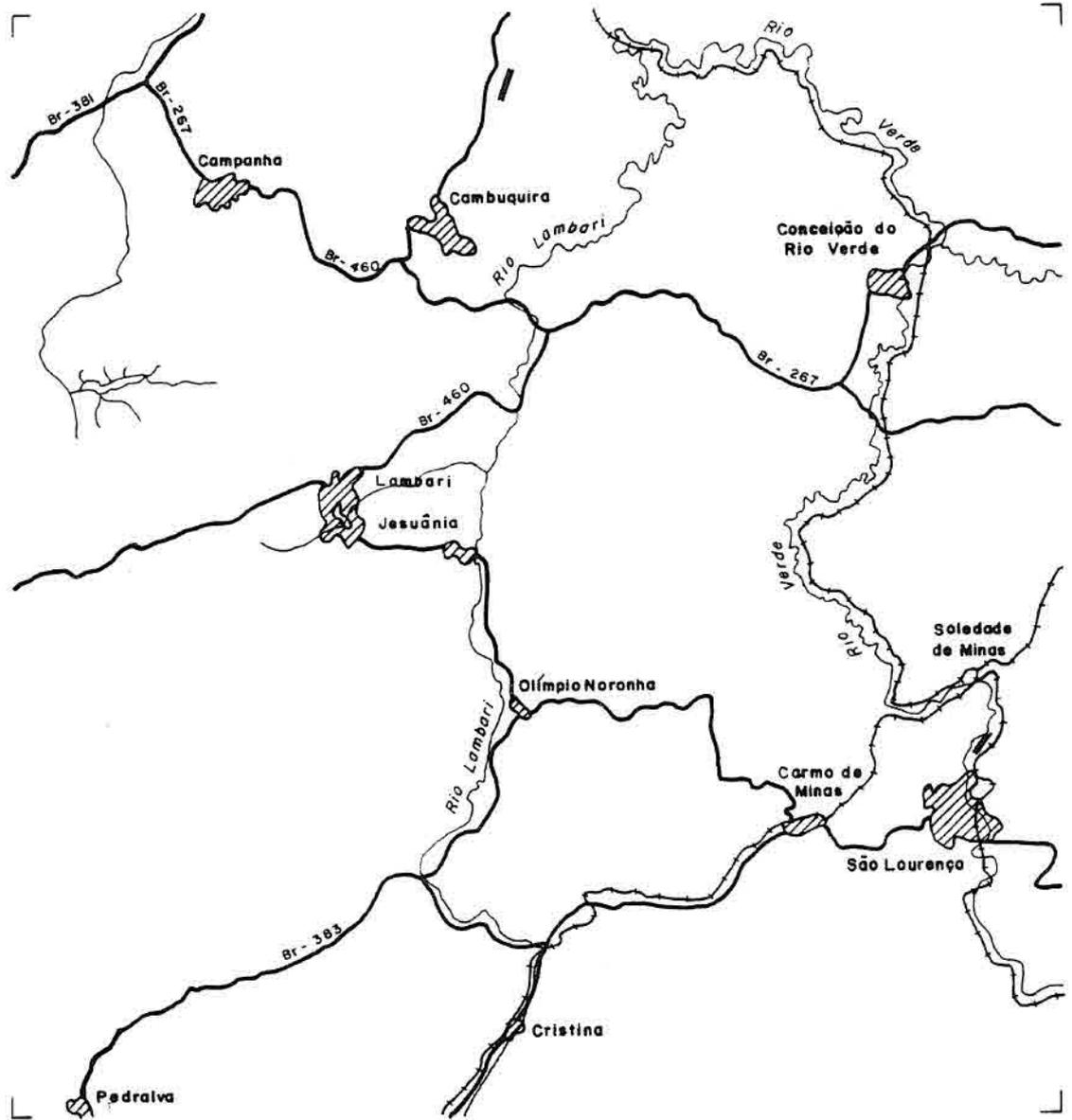
A leste da região central, entre Olímpio Noronha e Lambari, tendem a se paralelizar com o sistema N70E até E-W (Fig. 4.1 e 4.3). E em direção ao extremo nordeste ocorre um aumento da componente inversa/empurrão com sentido para NNW (Fig. 4.7).

#### SISTEMA N35-40W

A este sistema associam-se as falhas que cortam toda a extensão da área apresentando moderada frequência (Fig. 4.1). Foram obtidos deslocamentos sinistrais para estas estruturas, porém não se afasta a possibilidade de estarem associadas também a falhas com movimentos normais. Aproximadamente nesta direção, ocorre a maior frequência de zonas de juntas extraídas da imagem (Fig. 4.9).

#### SISTEMA N65-70W

Compreende os lineamentos de menor frequência na área de estudo, são geralmente pouco extensos (até 15 km). A maior frequência deste sistema aparece na região sudoeste, entre Cristina e Pedralva. Ocorrem associados a falhas com movimento normal por não ter sido observado na imagem ou em campo feições indicando deslocamentos direcionais para este sistema.



**SINAIS CONVENCIONAIS**

- RODOVIAS
- FERROVIAS
- ▨ ÁREA URBANA
- DRENAGEM
- AEROPORTO

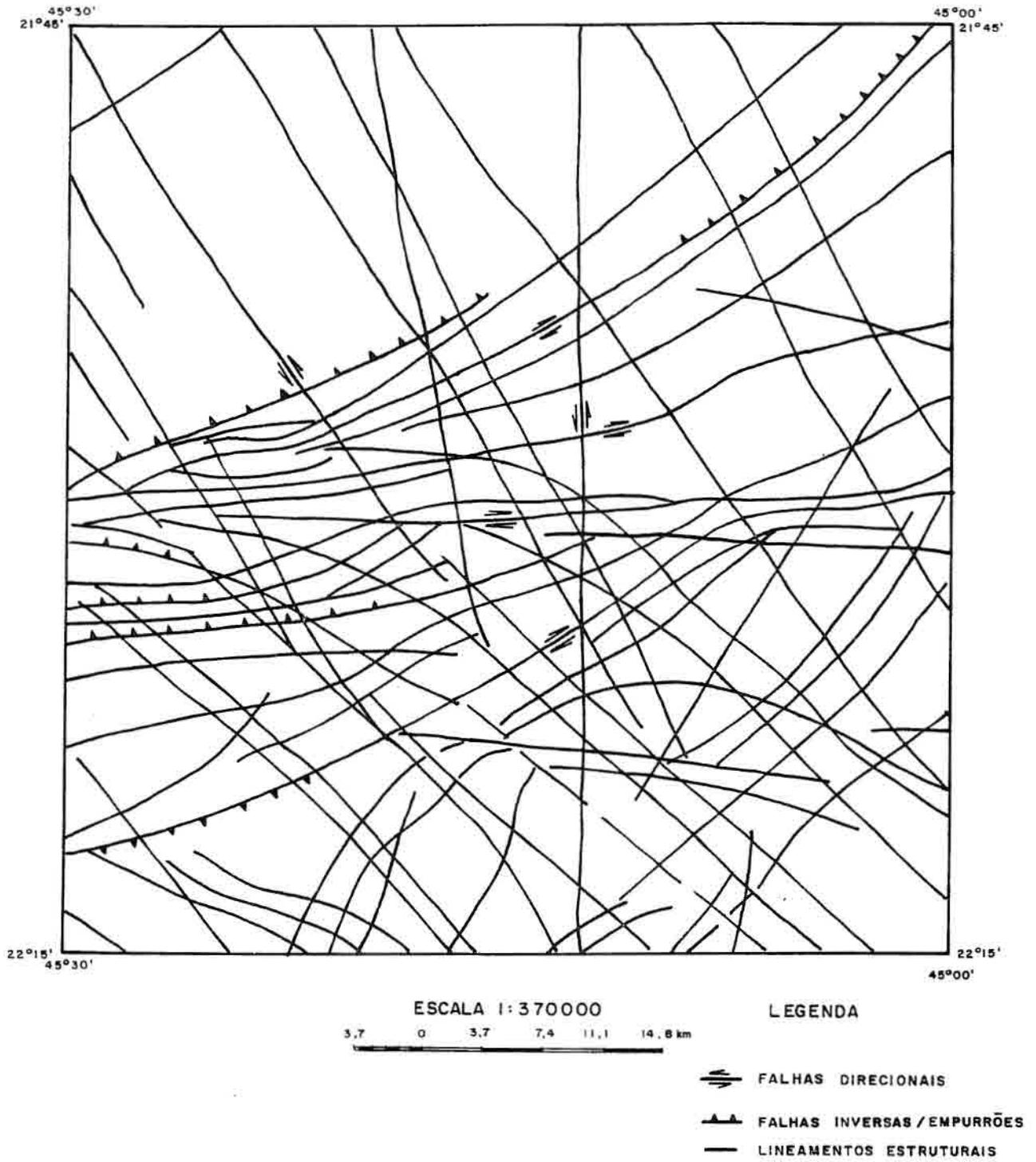


Fig. 4.1 - Mapa estrutural com lineamentos e falhamentos interpretados sobre as imagens TM-Landsat-5 e reconhecidos no trabalho de campo.

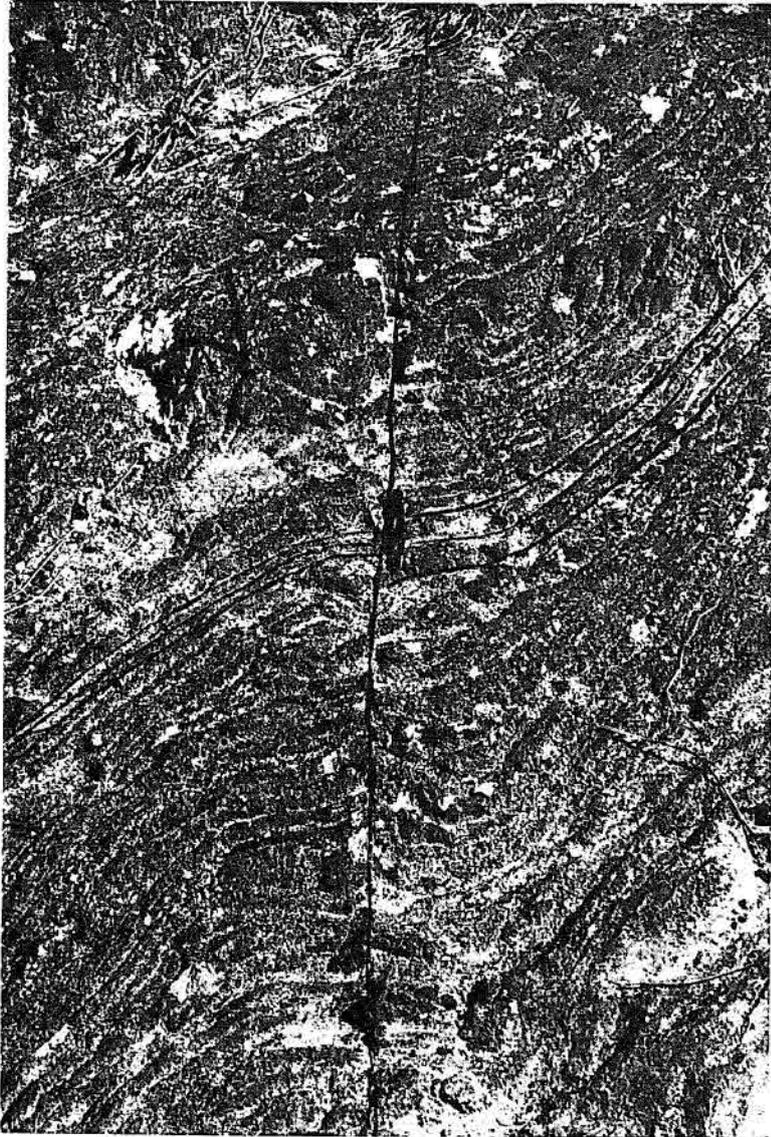


Fig. 4.2 - Falha normal com direção N-S cortando flanco de dobra de arrasto com eixo vertical atitude de flanco N70E/vertical, localizada nas proximidades de Jesuânia.

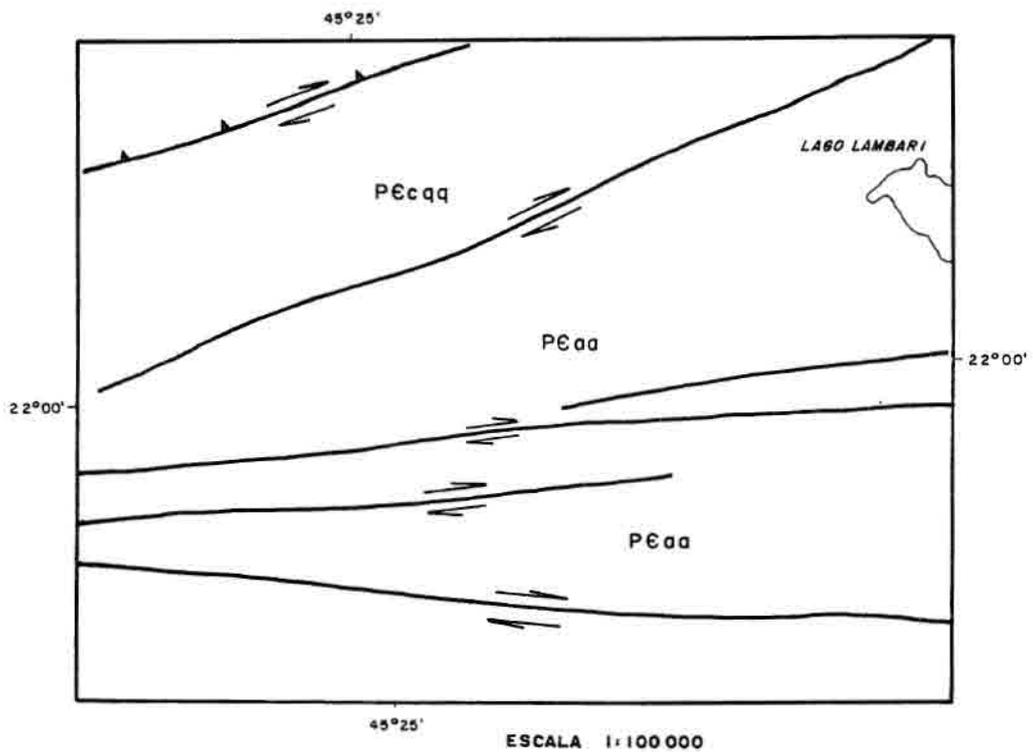


Fig. 4.3 - Aspecto de falhas transcorrentes destrais associadas a falhas inversas/ de empurrões apresentando orientação preferencial E-W, localizadas entre Lambari e Jesuânia em unidades do Grupo Andrelândia (PЄaa).



Fig. 4.4 - Dobras de arrasto indicando deslocamento dextral ao longo da foliação cataclástica com direção N65-70E e martelo mostrando o plano de falha paralela a esta foliação (Proximidades de Soledade de Minas).

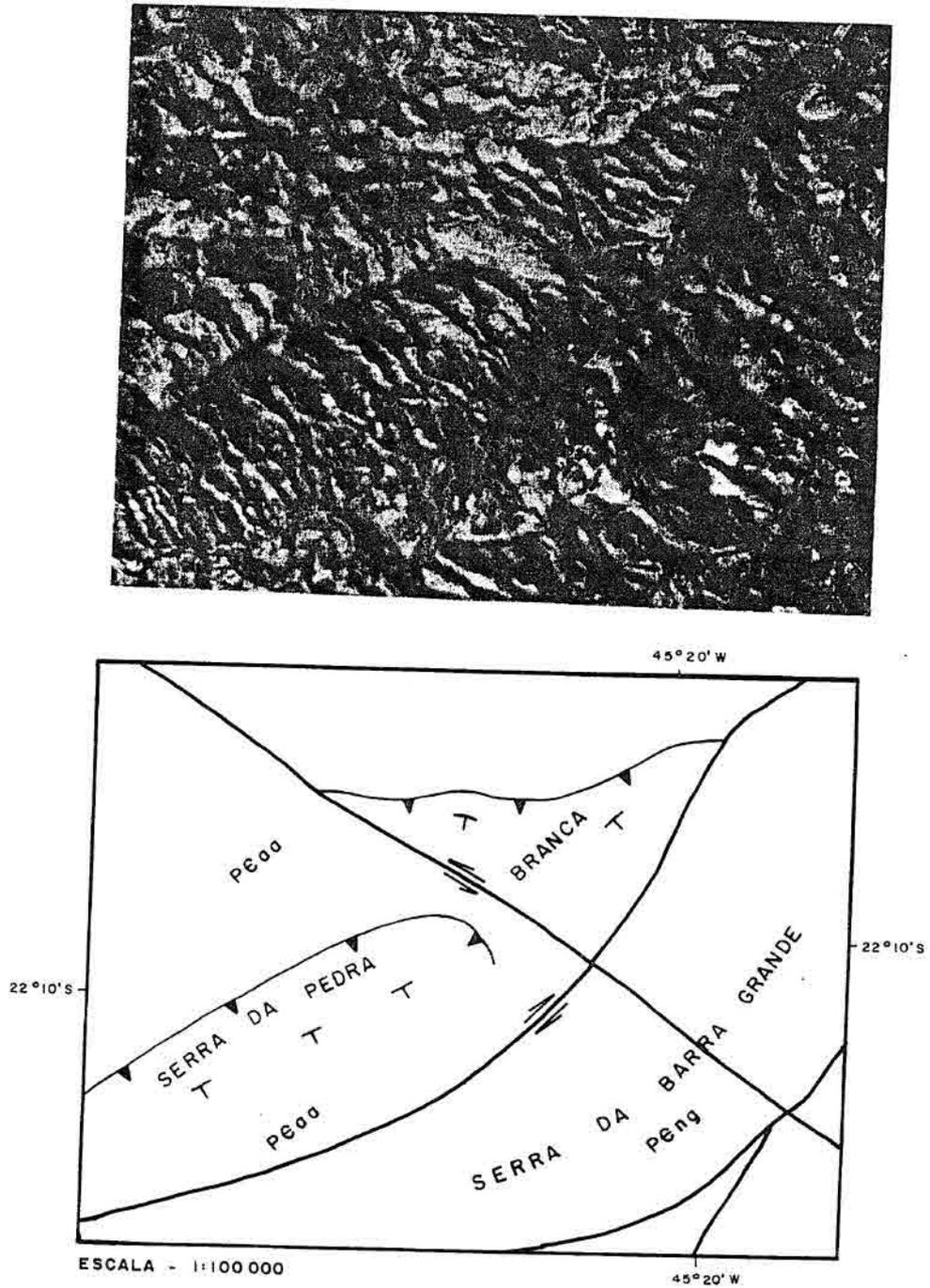


Fig. 4.5 - Falhas inversas e falhas direcionais dextrais presentes nas unidades do Grupo Andrelândia (P&Eaa) e Complexo Amparo (P&Eng) compondo as Serras de Santa Branca e da Barra Grande (oeste de Olímpio Noronha).

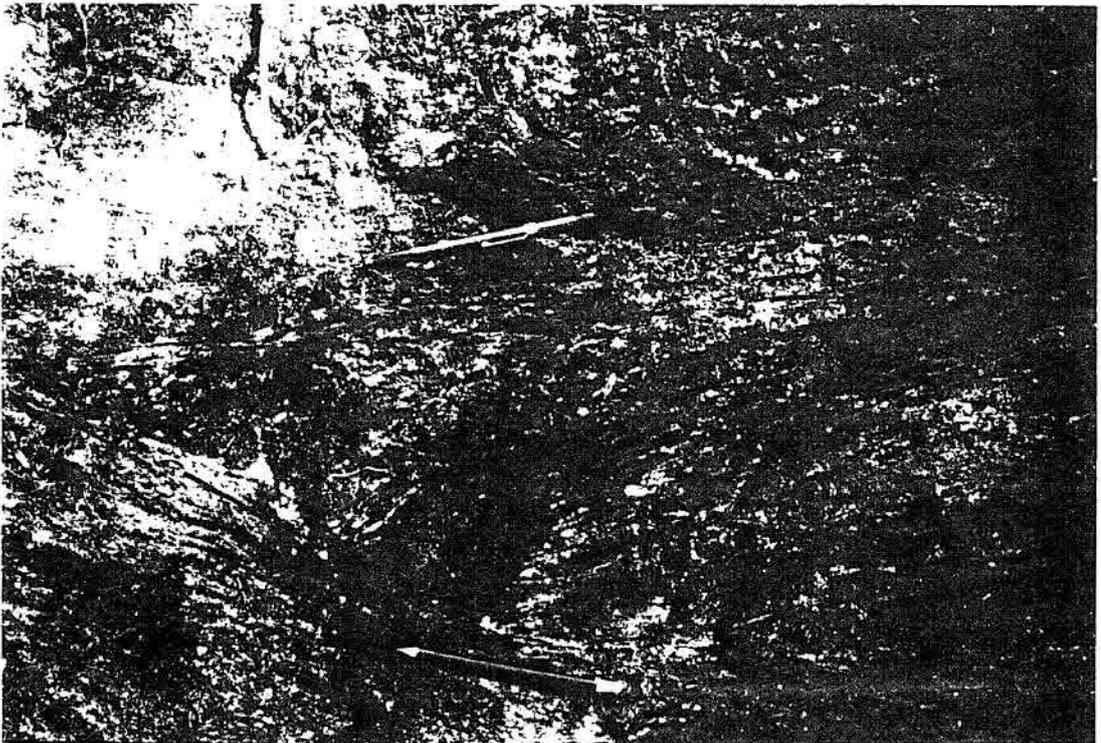


Fig. 4.6 - Lente de cisalhamento na área de estudo representada pelas principais direções de lineamentos estruturais N45-50E e N65-60E (Localizada nas proximidades de Cristina).

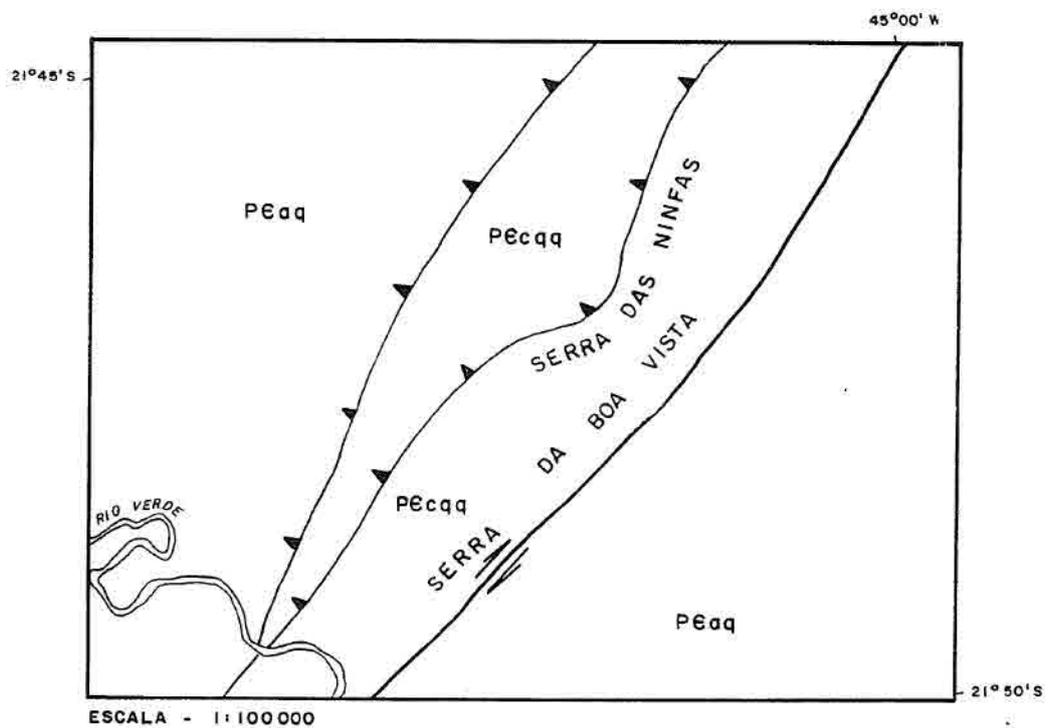
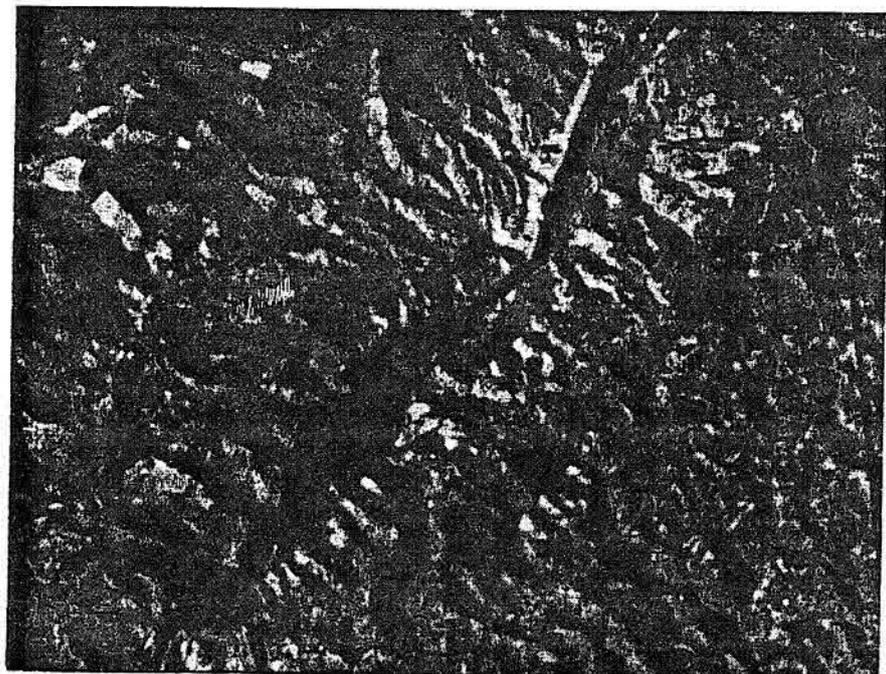


Fig. 4.7 - Falhas inversas/de empurrões com componentes direcionais destrais NE, apresentando aumento do movimento para N-NW, localizadas no extremo nordeste da área de estudo em unidades do Grupo Andrelândia (P&Eccqq e P&Eaaq).

#### 4.2 - MAPA DE ISOFREQUÊNCIA DE ZONAS DE JUNTAS

O mapa de isofrequência foi elaborado a partir da digitalização dos traços de zonas de juntas no SGI (Sistema de Informações Geográficas); totalizando 21.781 traços digitalizados (Fig. 4.8). Pela análise da roseta na Figura 4.9, verifica-se que a maior concentração de zonas de juntas apresenta direção principal N40-50W. Embora este fato tenha sido confirmado no campo, deve -se considerar também que as estruturas com esta direção possuem nas imagens fotográficas um realce morfológico mais acentuado, proporcionado pela estruturação que encontra-se perpendicular ao azimute solar (N48E). Durante o trabalho de campo, as juntas com direção N40-50W apresentaram as maiores aberturas, geralmente centimétricas.

Neste mapa foram estabelecidas sete classes de curvas de isofrequências de zonas de juntas: 0-8%, 8-16%, 16-24%, 24-32%, 32-40%, 40-48% e >48% (Fig. 4.10).

Analisando a distribuição destas classes na área de estudo verifica-se que a frequência de zonas de juntas apresenta valores em geral superiores a 16% e as maiores concentrações de zonas de juntas, ou seja, aquelas com frequência superior a 40%, estão localizadas principalmente na porção central e sul da região.

Pelo fato das áreas com maiores concentrações de zonas de juntas também representarem as áreas com maiores permeabilidades secundárias e conseqüentemente auxiliarem na determinação de locais favoráveis à prospecção de água subterrânea, considerou-se neste mapa as curvas de isofrequência com intervalos entre 0 e 32% como de baixa frequência; entre 32 e 40% de moderada e > 40% como de alta frequência de zonas de juntas.

#### 4.3 - MAPA DE EIXOS DE MÁXIMOS DE ZONAS DE JUNTAS

Este mapa, representado na Figura 4.10, foi elaborado considerando alguns conceitos discutidos nos Itens 3.3.5 e 3.3.8, onde a persistência de zona de juntas ao longo de uma direção indicam falhamentos antigos que foram reativados.

Dessa forma, as curvas de isofrequência de zonas de juntas que apresentaram as maiores concentrações de zonas de juntas (32-40%, 40-48% e >40%) foram elaboradas para cada um dos intervalos angulares das principais direções dos falhamentos presentes na área de estudo, ou seja, N0-5E, N45-50E, N65-70E, N85-90E, N35-40W e N65-70W, como demonstrado pelas Figuras 4.11, 4.12, 4.13, 4.14, 4.15 e 4.16.

Na Figura 4.17, onde estão representadas a distribuição dos eixos de máximos de zonas de juntas para todos os intervalos angulares, observa-se que:

- Para as direções de fraturamentos N-S, N45-50E, N65-70E e E-W as curvas de isofrequência de máximos apresentaram aproximadamente os mesmos eixos. dentre os quais destacam-se aqueles com direção N45-50E, N65-70E e N35-40W pela maior concentração;

Tais resultados indicam que as direções N45-50E, N65-70E e N35-40W representam sistemas de fraqueza relativamente mais antigos que condicionaram o desenvolvimento dos sistemas de fraturas mais novos durante reativações ocorridas em tempos Pós-pré-Cambrianos.

- As concentrações e as interseções de eixos de máximos apresentam distribuição aproximadamente homogênea em toda a área.

- Os eixos de máximos com direções N45-50E e N65-70E geralmente encontram-se paralelizados aos eixos dos dobramentos flexurais identificados na área de estudo indicando associação entre estas estruturas, as quais posteriormente serão discutidas no item 4.5.

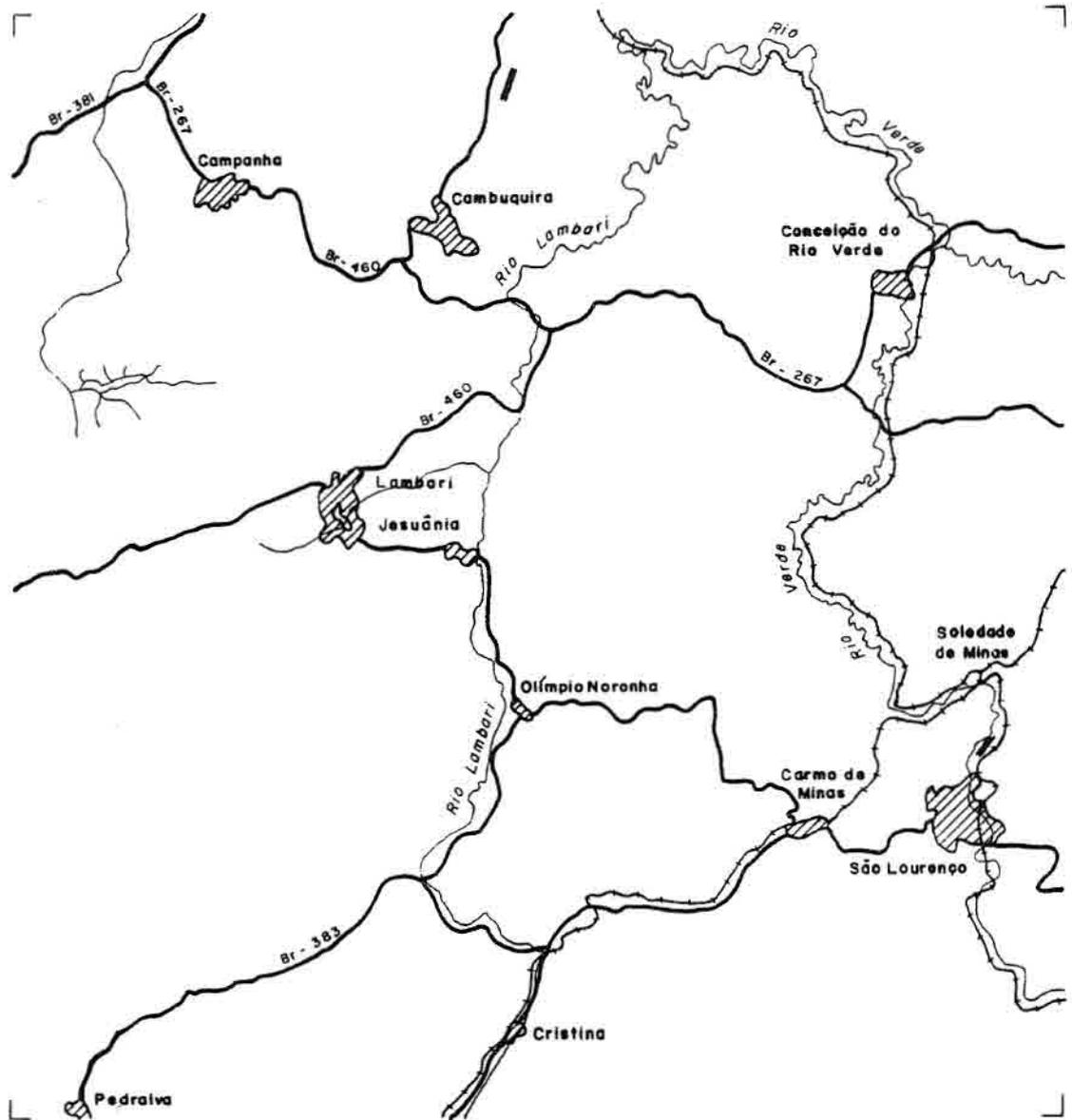
#### 4.4 - MAPA DE CONDICIONANTES HIDROGEOLÓGICOS

Este mapa apresenta as linhas de contorno estrutural com a indicação dos altos e baixos estruturais e as principais direções de falhamentos na área de estudo (Fig. 4.18).

Nesse mapa, observa-se claramente a divisão anteriormente elaborada para os três setores estruturais e a influência da estruturação NE na região.

A movimentação dos blocos, principalmente ao longo das falhas com direção N45-50E e N65-70E, propiciaram a formação de dobramentos flexurais durante regimes distensivos em tempos pós-Pré-cambrianos. Estes dobramentos, que configuram altos e baixos estruturais, possuem eixos horizontais a subhorizontais, geralmente paralelos às direções acima. A Figura 4.18 indica estas feições pelas linhas de contorno estrutural. As relações de simetria da rede de drenagem, ou seja, a comparação entre os caimentos dos canais de drenagens subseqüentes e obseqüentes, indicados pelas linhas de contorno estrutural, possibilita considerar alguns aspectos sobre a distribuição de água subterrânea ao longo dos altos e baixos estruturais e conseqüentemente determinar os locais onde as estruturas geológicas (juntas e falhas) são favorecidas pelo armazenamento de água subterrânea na região.

Muitas das zonas de juntas analisadas estão também relacionadas a estes dobramentos flexurais formando juntas diagonais, transversais ou longitudinais ao longo de seus eixos.



**SINAIS CONVENCIONAIS**

- RODOVIAS
- FERROVIAS
- ▨ ÁREA URBANA
- DRENAGEM
- ▧ AEROPORTO

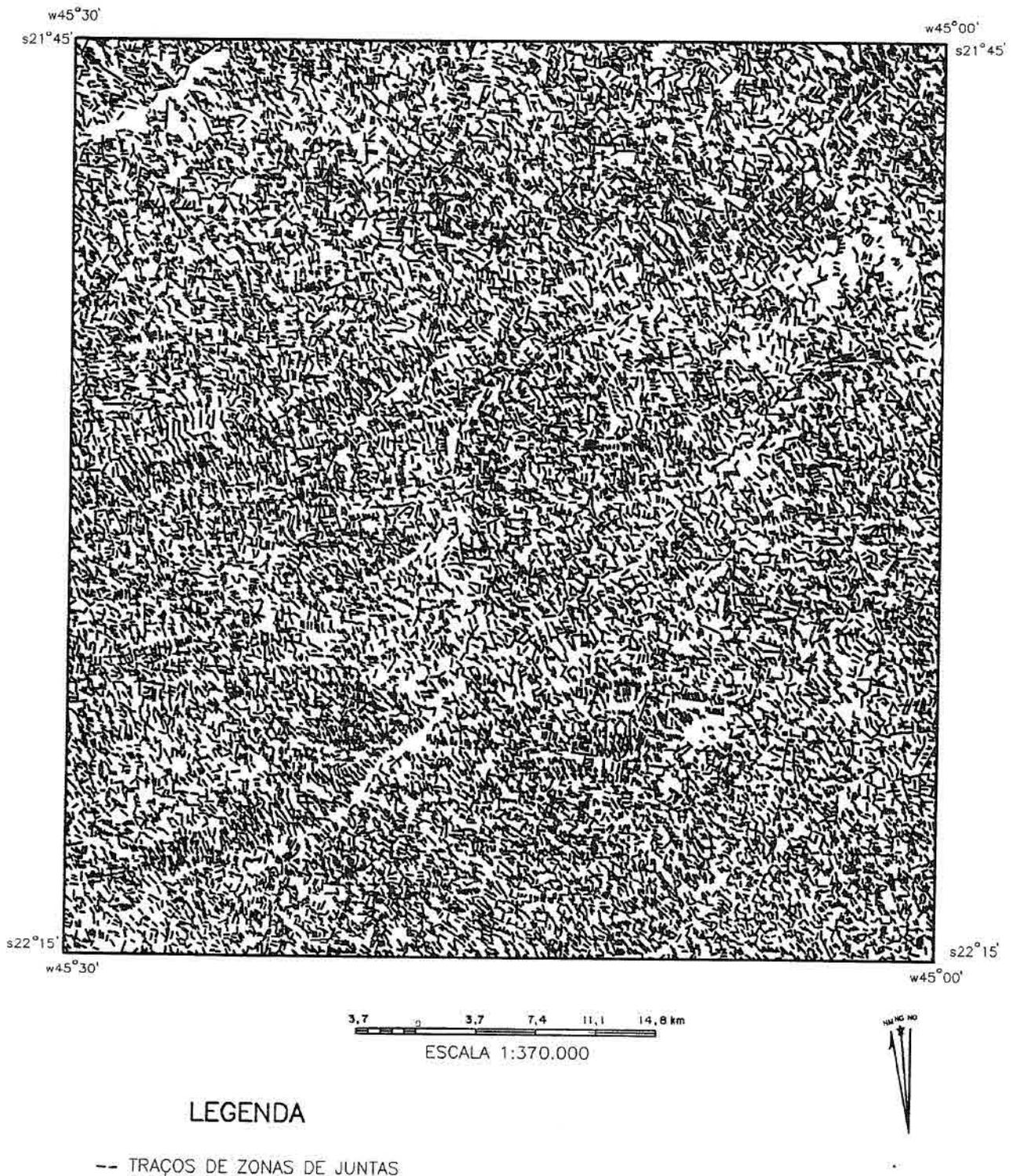


Fig. 4.8 -Mapa de traços de zonas de juntas interpretados a partir de feições lineares de drenagem obtidas das imagens fotográficas.

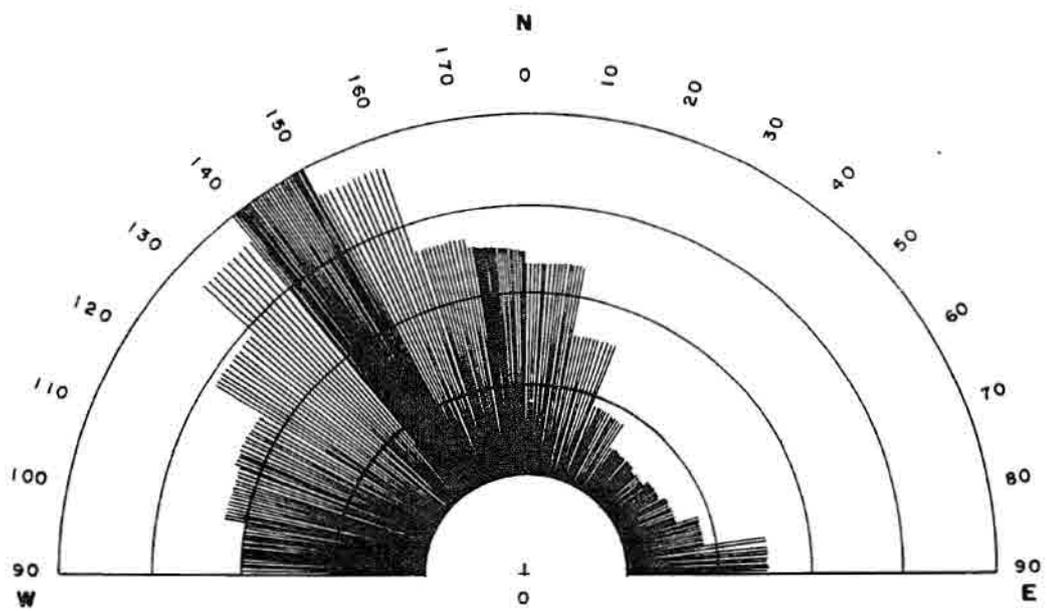
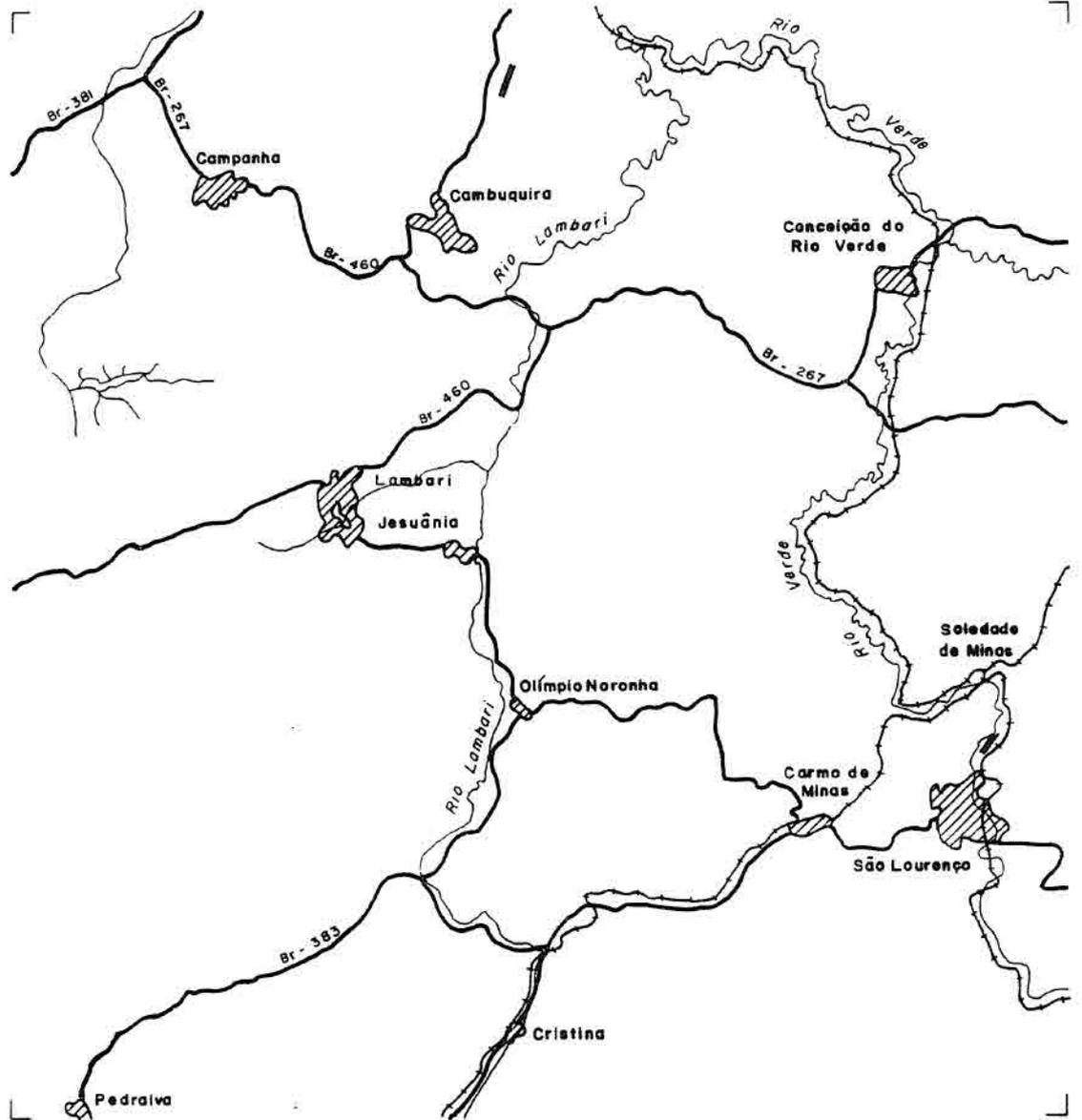
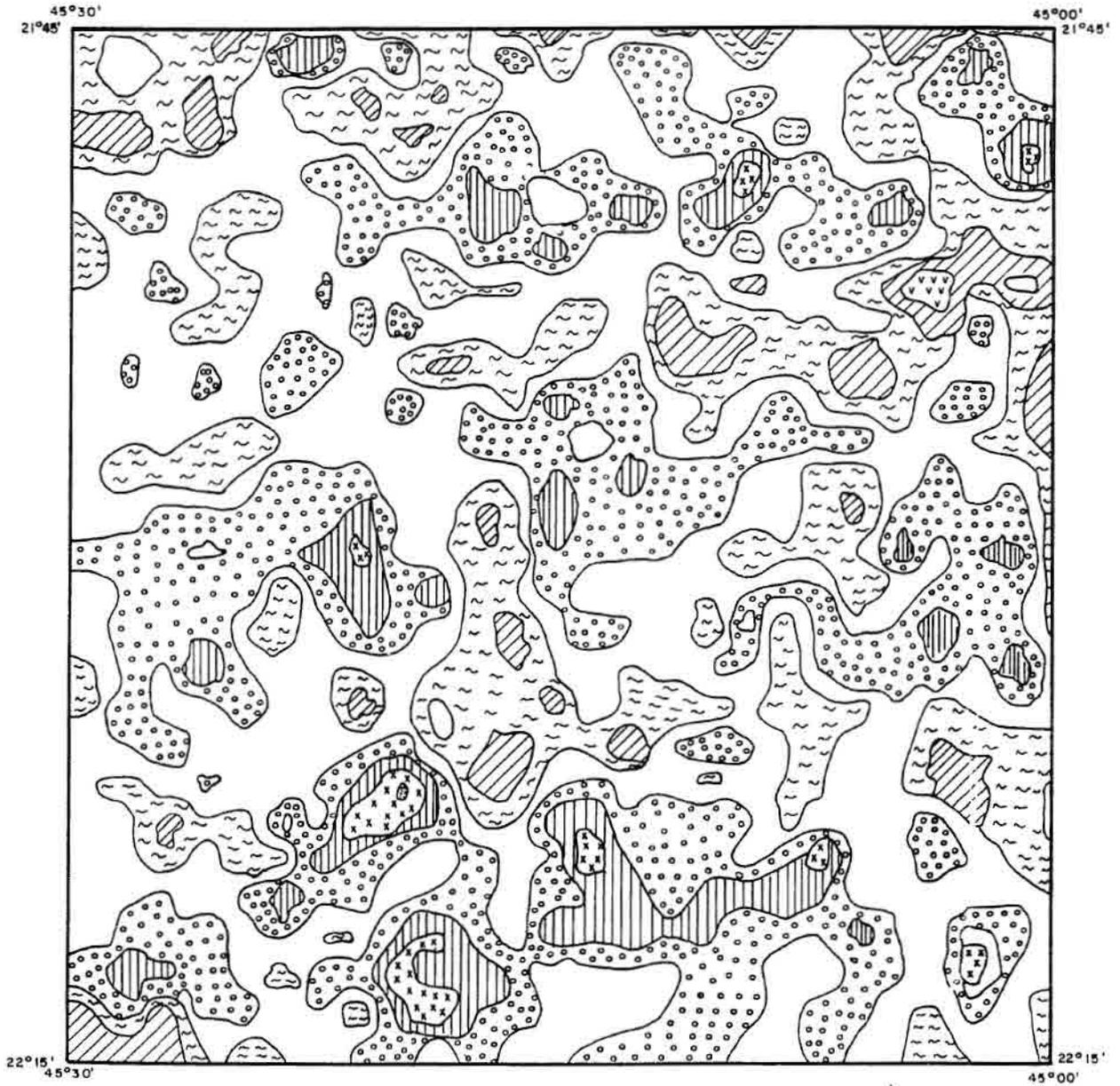


Fig. 4.9 - Rosácea confeccionada no SGI, indicando direção principal de zonas de juntas obtidas da imagem fotográfica.



**SINAIS CONVENCIONAIS**

- RODOVIAS
- FERROVIAS
- ▨ ÁREA URBANA
- DRENAGEM
- AEROPORTO



ESCALA 1: 370000

3,7 0 3,7 7,4 11,1 14,8 km

LEGENDA

CURVAS DE ISOFREQUÊNCIA DE MÁXIMOS DE ZONAS DE JUNTAS

-  - 0 - 8 %
-  - 8 - 16 %
-  - 16 - 24 %
-  - 24 - 32 %
-  - 32 - 40 %
-  - 40 - 48 %
-  > 48 %

Fig. 4.10 - Mapa de curvas de isofrequência de zonas de juntas.

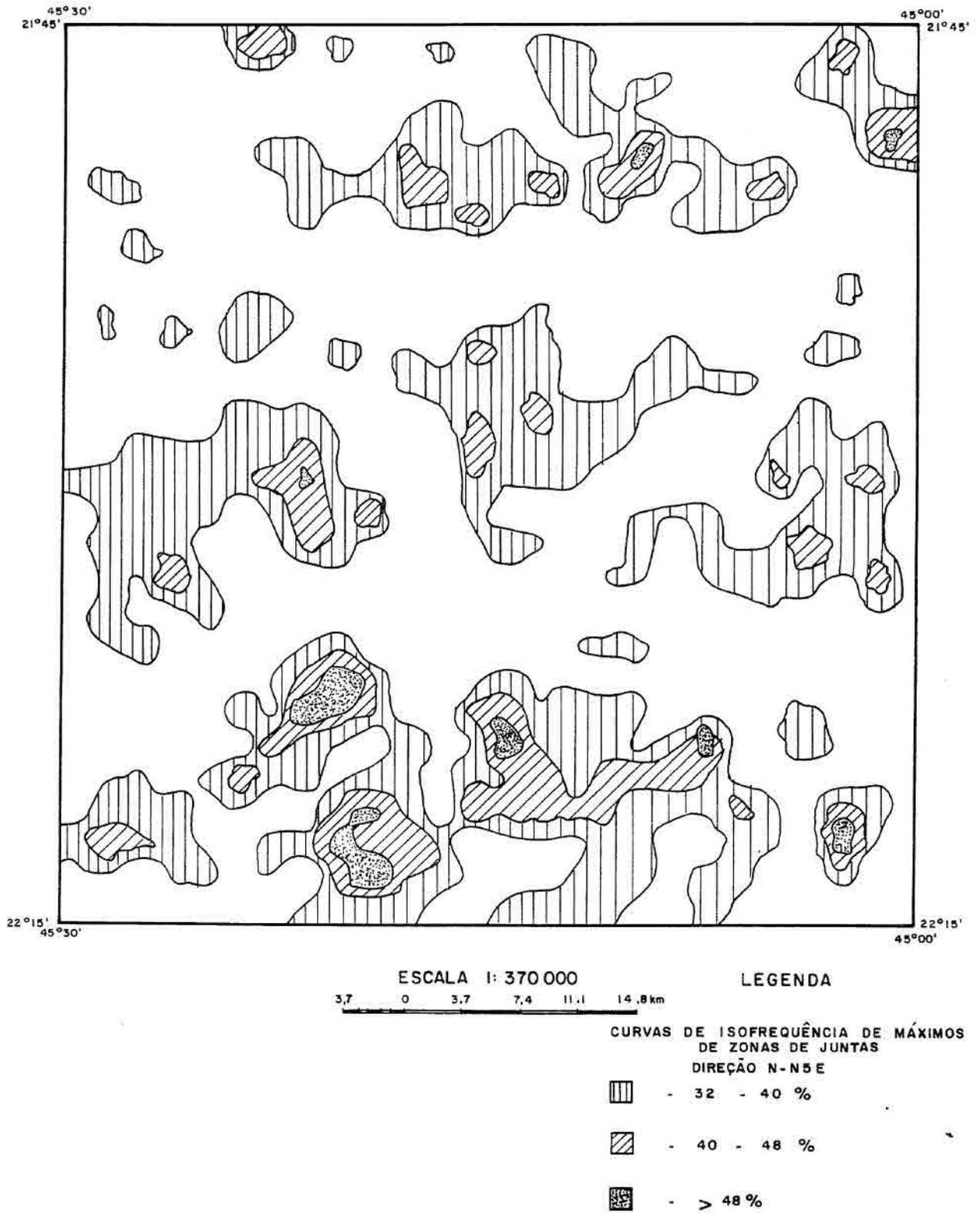


Fig. 4.11 - Curvas de isofrequência de zonas de juntas para a direção N0-5E.

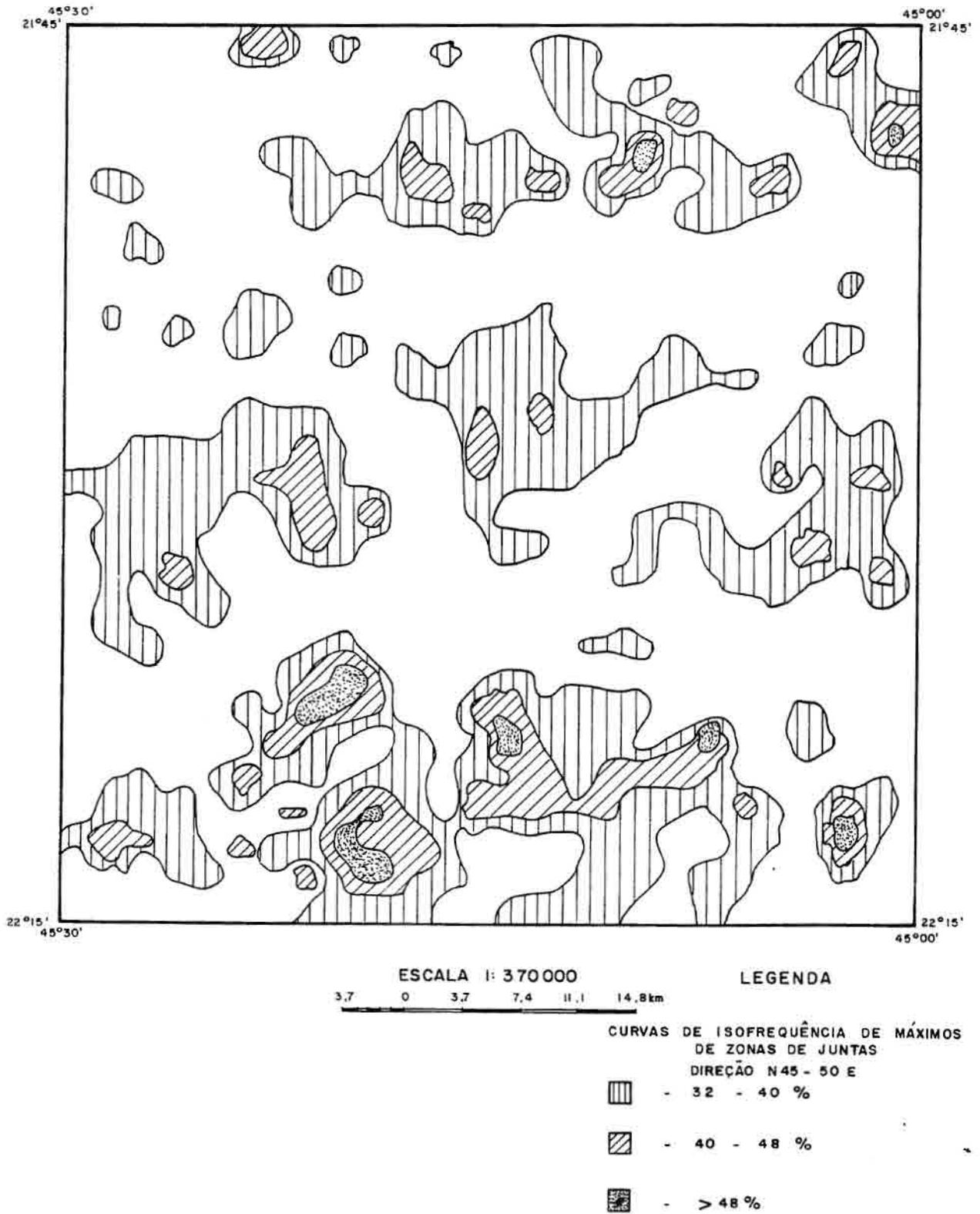


Fig. 4.12 - Curvas de isofrequência de zonas de juntas para a direção N45-50E.

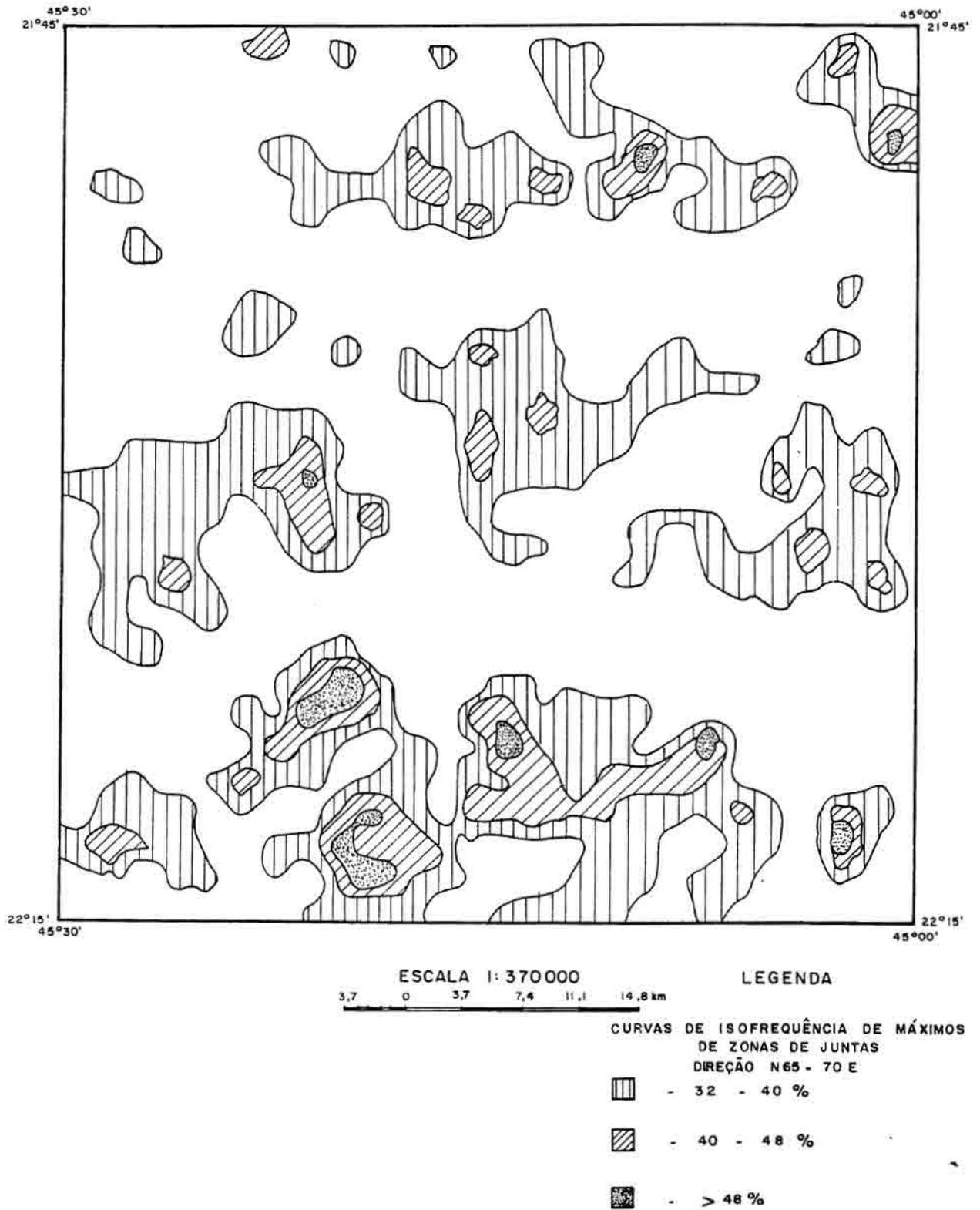


Fig. 4.13 - Curvas de isofrequência de zonas de juntas para a direção N65-70E.

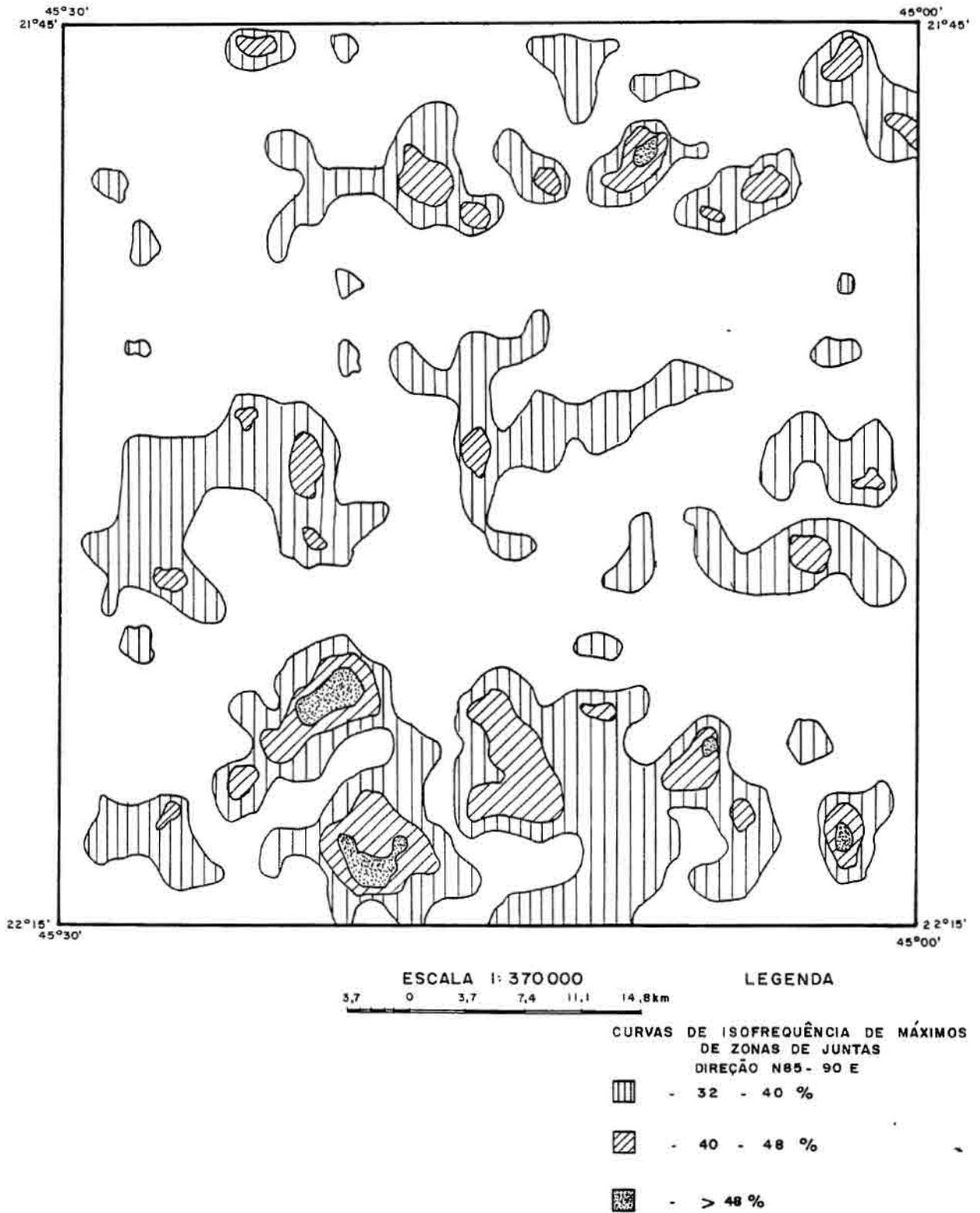


Fig. 4.14 - Curvas de isofrequência de zonas de juntas para a direção N85-90E.

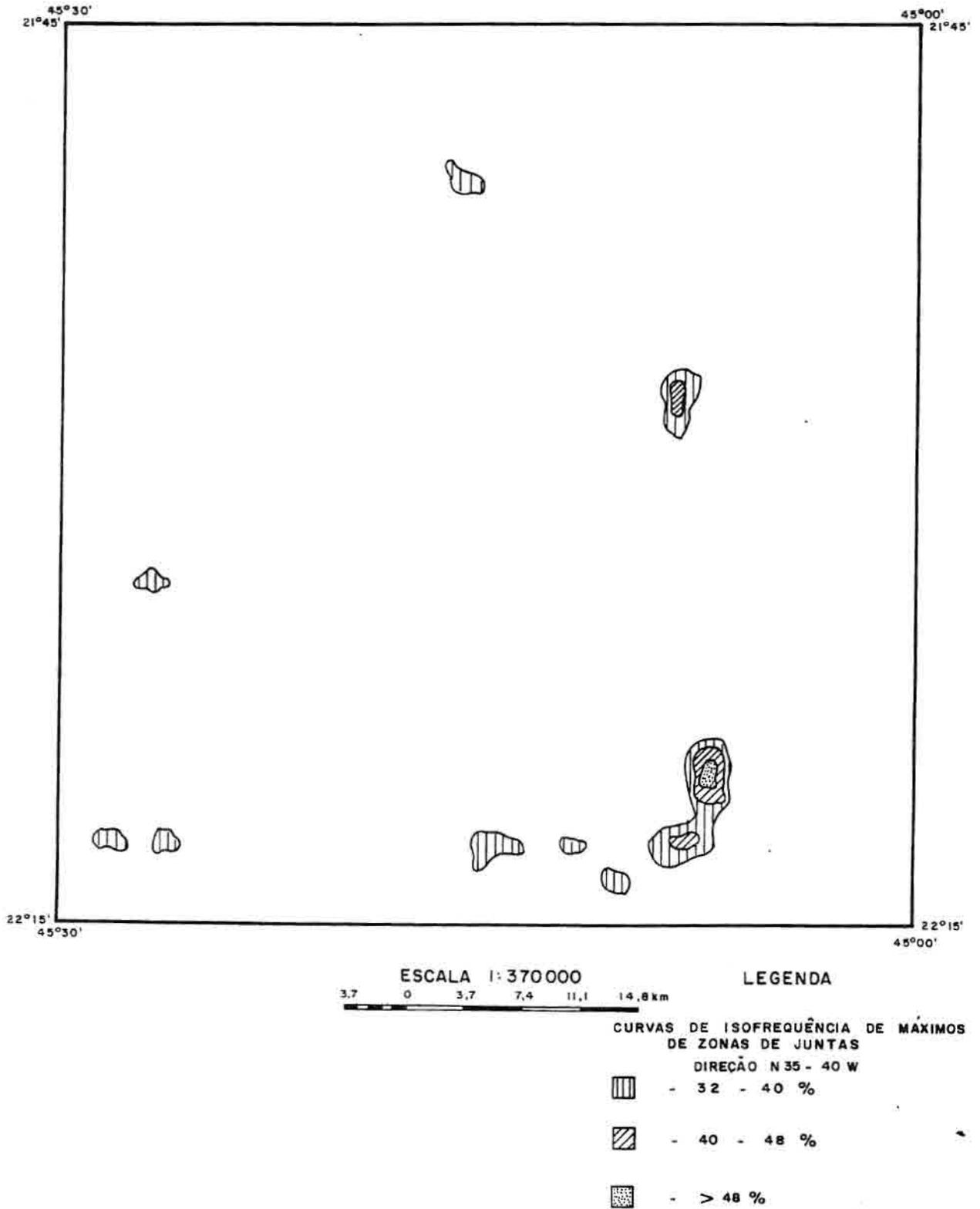
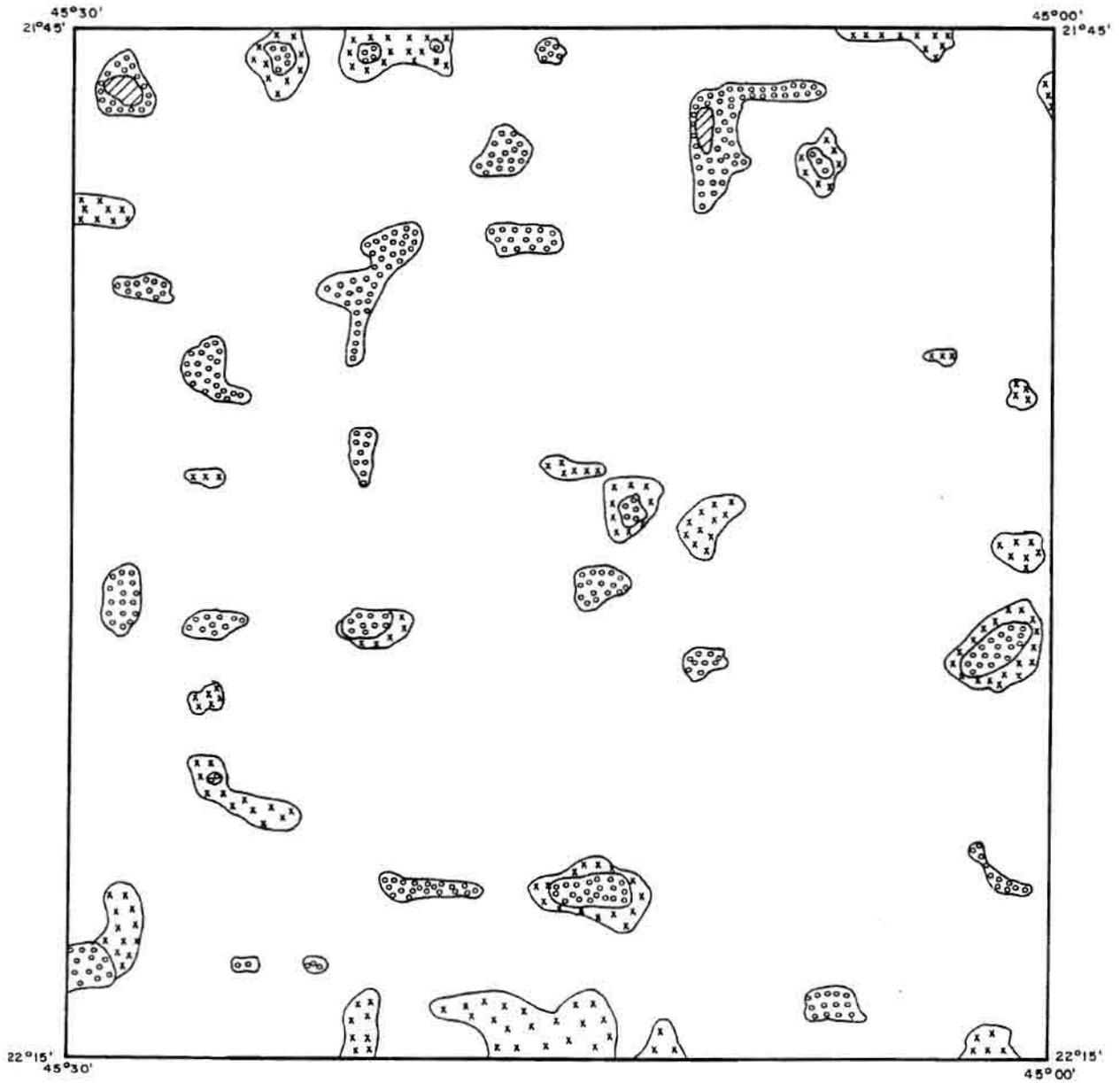


Fig. 4.15 - Curvas de isofrequência de zonas de juntas para a direção N35-40W.



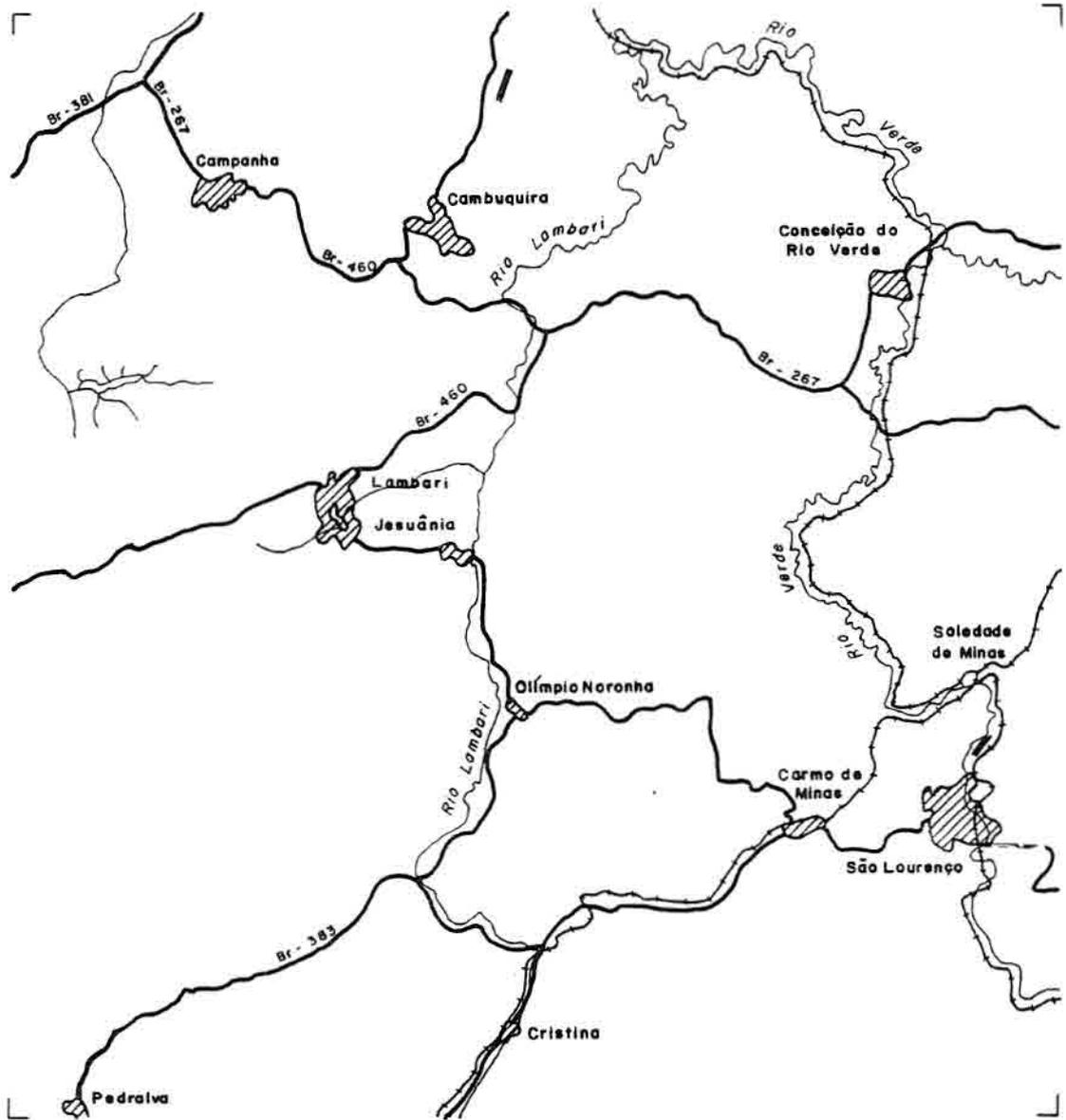
ESCALA 1:370000  
 3,7 0 3,7 7,4 11,1 14,8 km

LEGENDA

CURVAS DE ISOFREQUÊNCIA DE MÁXIMOS  
 DE ZONAS DE JUNTAS  
 DIREÇÃO N65 - 70W

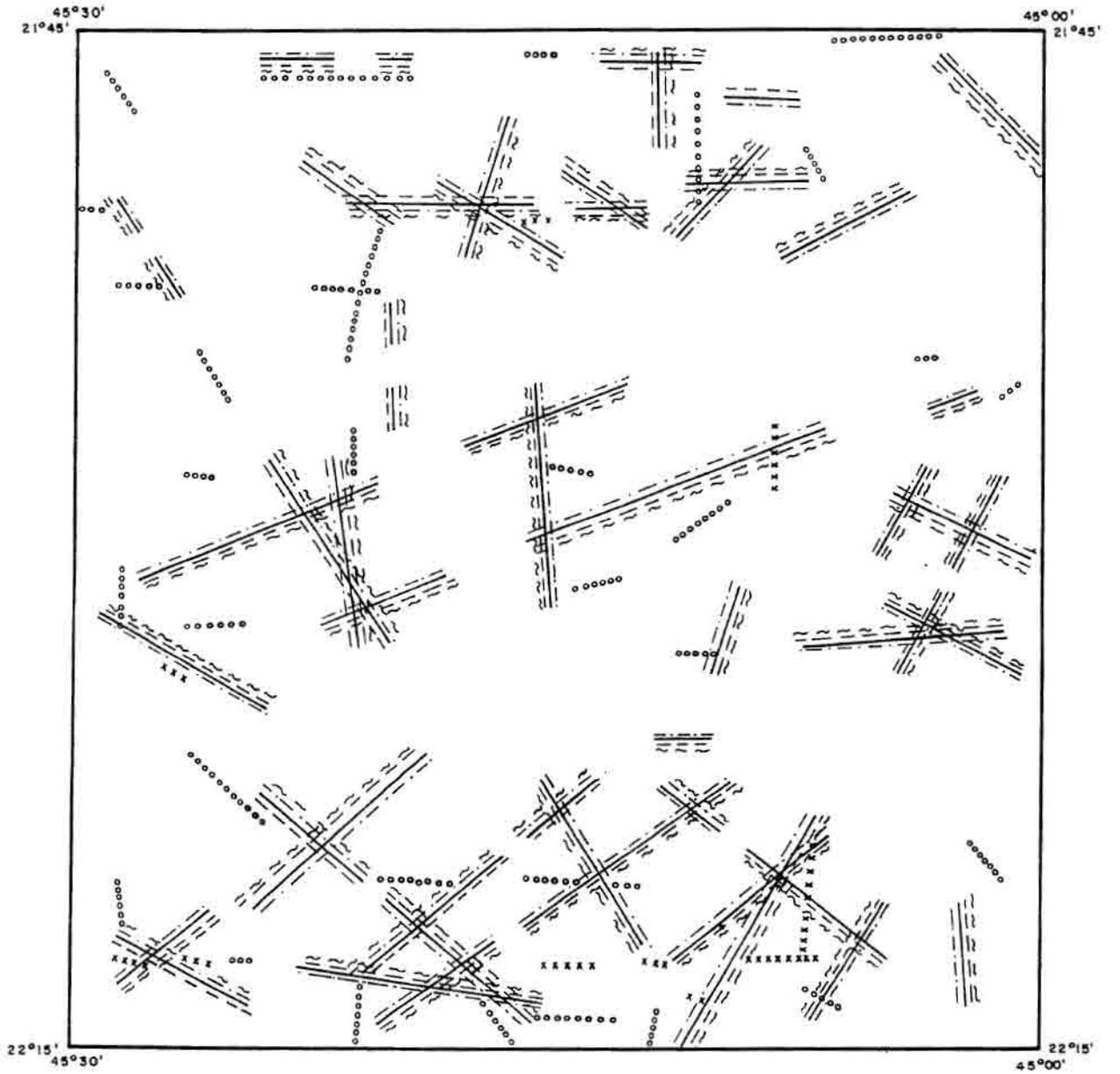
-  - 16 - 24 %
-  - 24 - 32 %
-  - 32 - 40 %

Fig. 4.16 - Curvas de isofrequência de zonas de juntas para a direção N65-70W.



**SINAIS CONVENCIONAIS**

- RODOVIAS
- FERROVIAS
- ▨ ÁREA URBANA
- DRENAGEM
- || AEROPORTO



ESCALA 1:370000

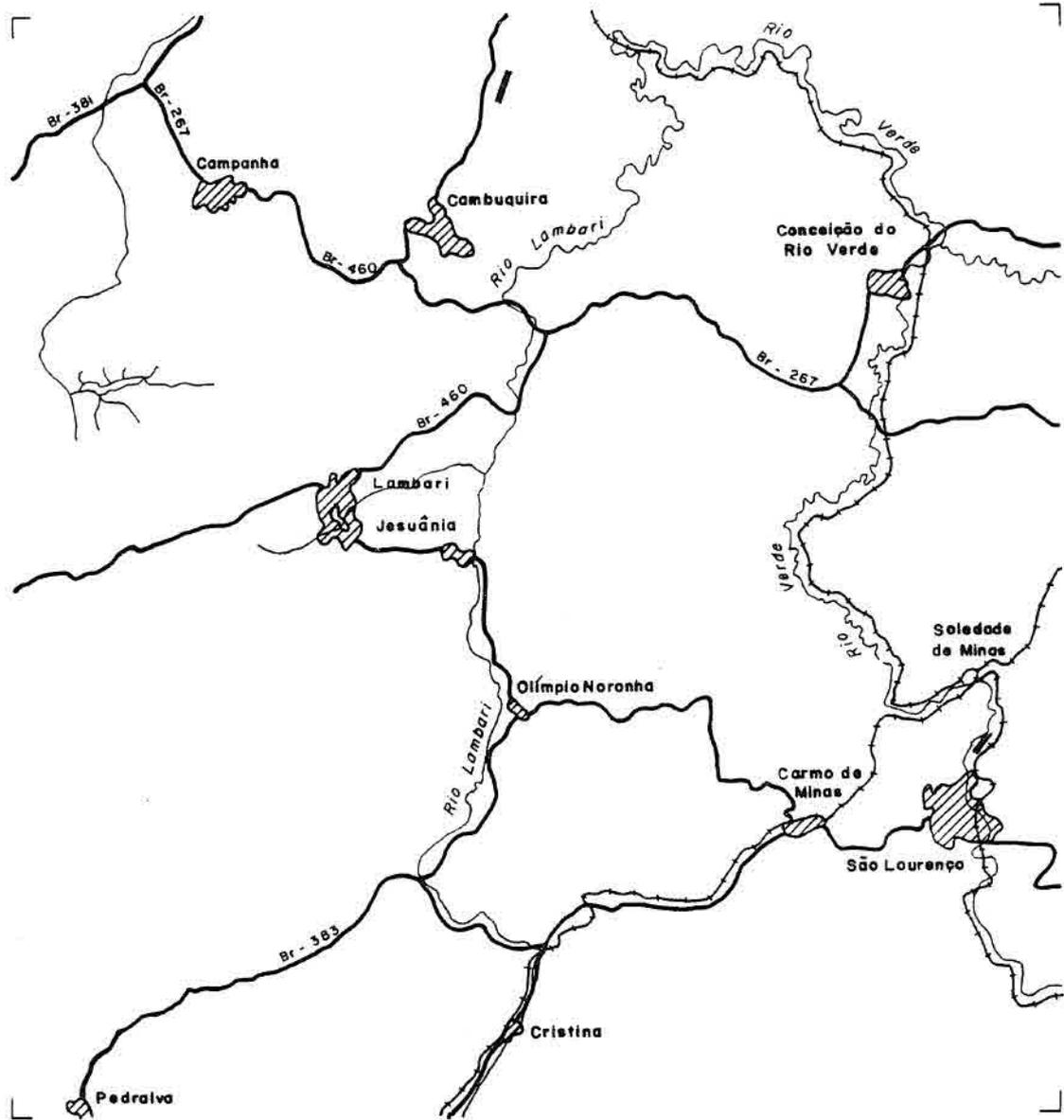
3,7 0 3,7 7,4 11,1 14,8 km

LEGENDA

DIREÇÕES DE EIXOS DE MÁXIMO POR INTERVALO ANGULAR

- ~ ~ E - W
- N - S
- - - N 65 - 70 E
- · - · N 45 - 50 E
- o o o o N 65 - 70 W
- x x x x N 35 - 40 W

Fig. 4.17 - Mapa de eixos de máximos de zonas de juntas para todos os intervalos considerados, ou seja, N0-5E, N45-50E, N65-70E, N85-90E, N35-40W e N65-70W.



**SINAIS CONVENCIONAIS**

- RODOVIAS
- - - FERROVIAS
- ▨ ÁREA URBANA
- ⌵ DRENAGEM
- || AÉROPORTO

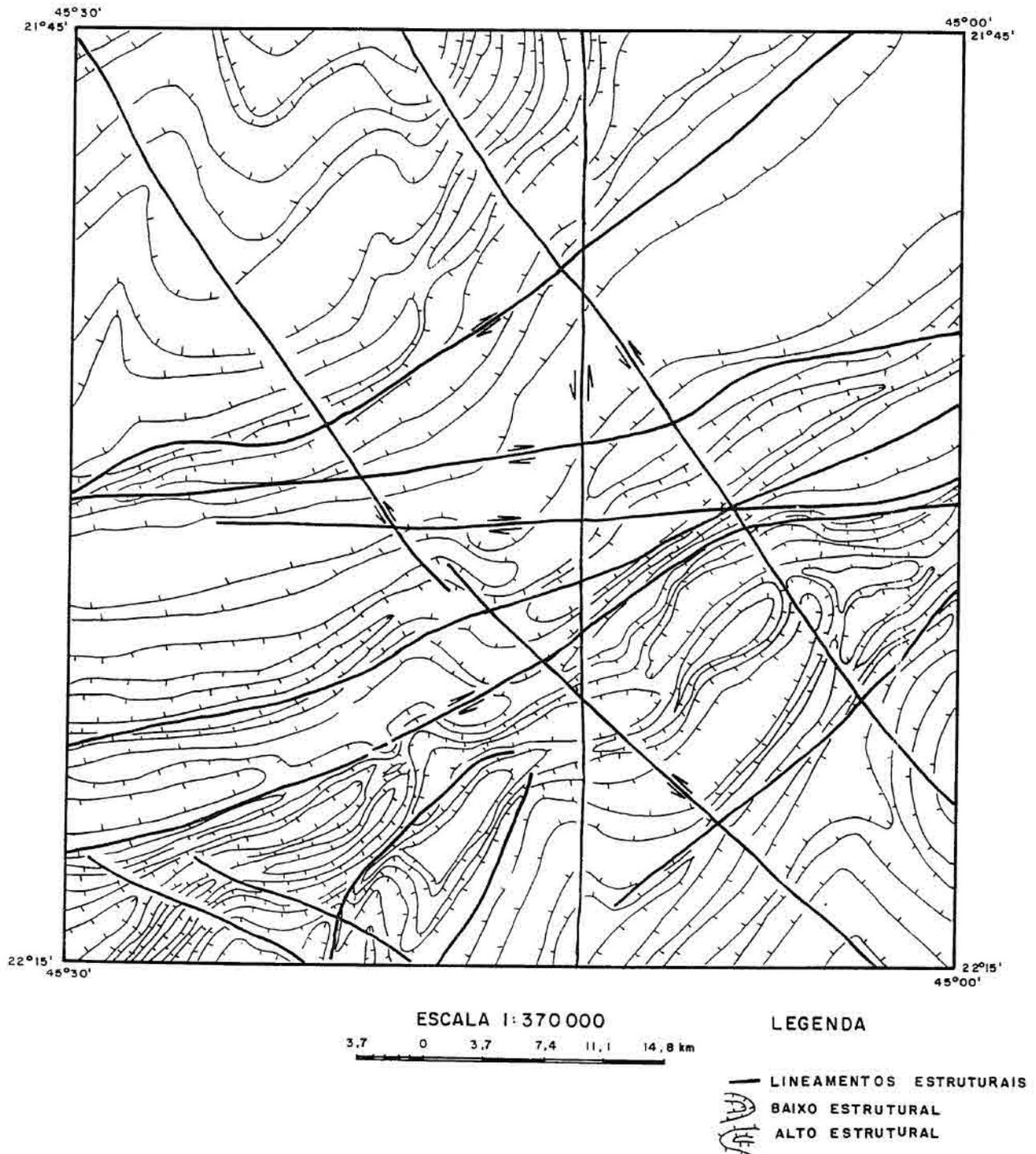


Fig. 4.18 - Mapa de condicionantes hidrogeológicas com as principais direções de falhamentos, as linhas de contorno indicam as relações de simetria da rede de drenagem e os altos e baixos estruturais.

#### 4.5 - MAPA LITOESTRUTURAL

O mapa, representado na Figura 4.19, foi elaborado com base no trabalho de campo e na análise das propriedades das feições lineares de relevo e drenagem, na escala 1:100.000. Foram identificadas oito unidades litoestruturais, as quais apresentaram correlações com os trabalhos de Cavalcante et al. (1979) e Artur (1988). A Tabela 4.1 apresenta as propriedades descritas para estas unidades, exceto para os aluviões.

As características da geometria e distribuição dos fraturamentos (lineamentos estruturais e zonas de juntas), litotipos e estruturas obtidas no campo (falhas, foliações e dobras) destacam três setores estruturais na área de estudo, os quais foram divididos em norte, central e sul (Fig. 4.20).

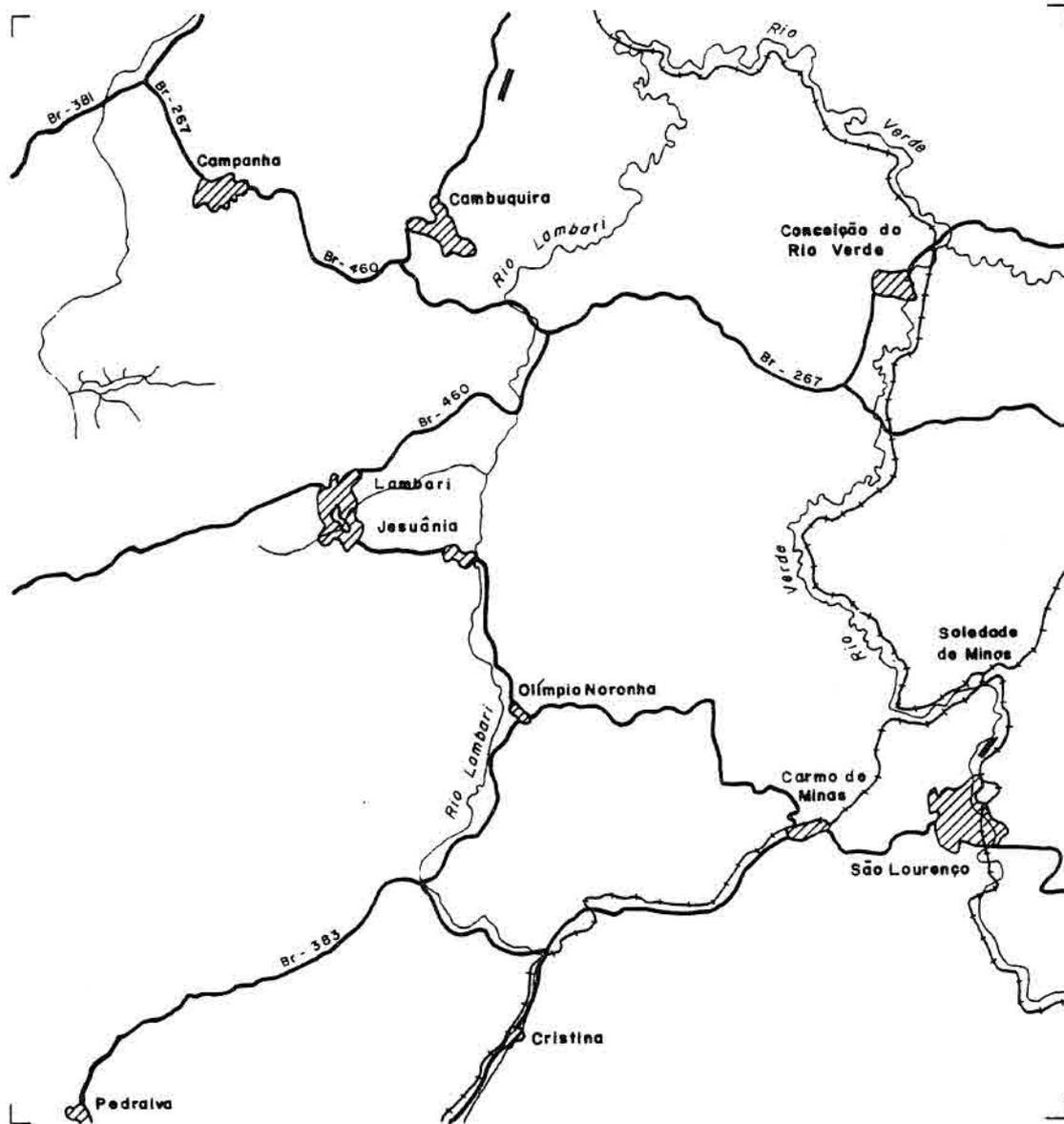
As lineações de estiramento mineral foram analisadas conjuntamente para os três setores. Apresentam atitude 240-250/10°, indicando o transporte das estruturas para NE (Fig. 4.21).

##### 4.5.1 - SETOR NORTE

Neste setor predominam as unidades do Grupo Andrelândia (Ebert, 1956) representadas por rochas metassedimentares de composição quartzo-micaxistos com granada (P<sub>eq</sub>) e subordinadamente milonito-gnaisses (P<sub>eg</sub>) (Fig. 4.19).

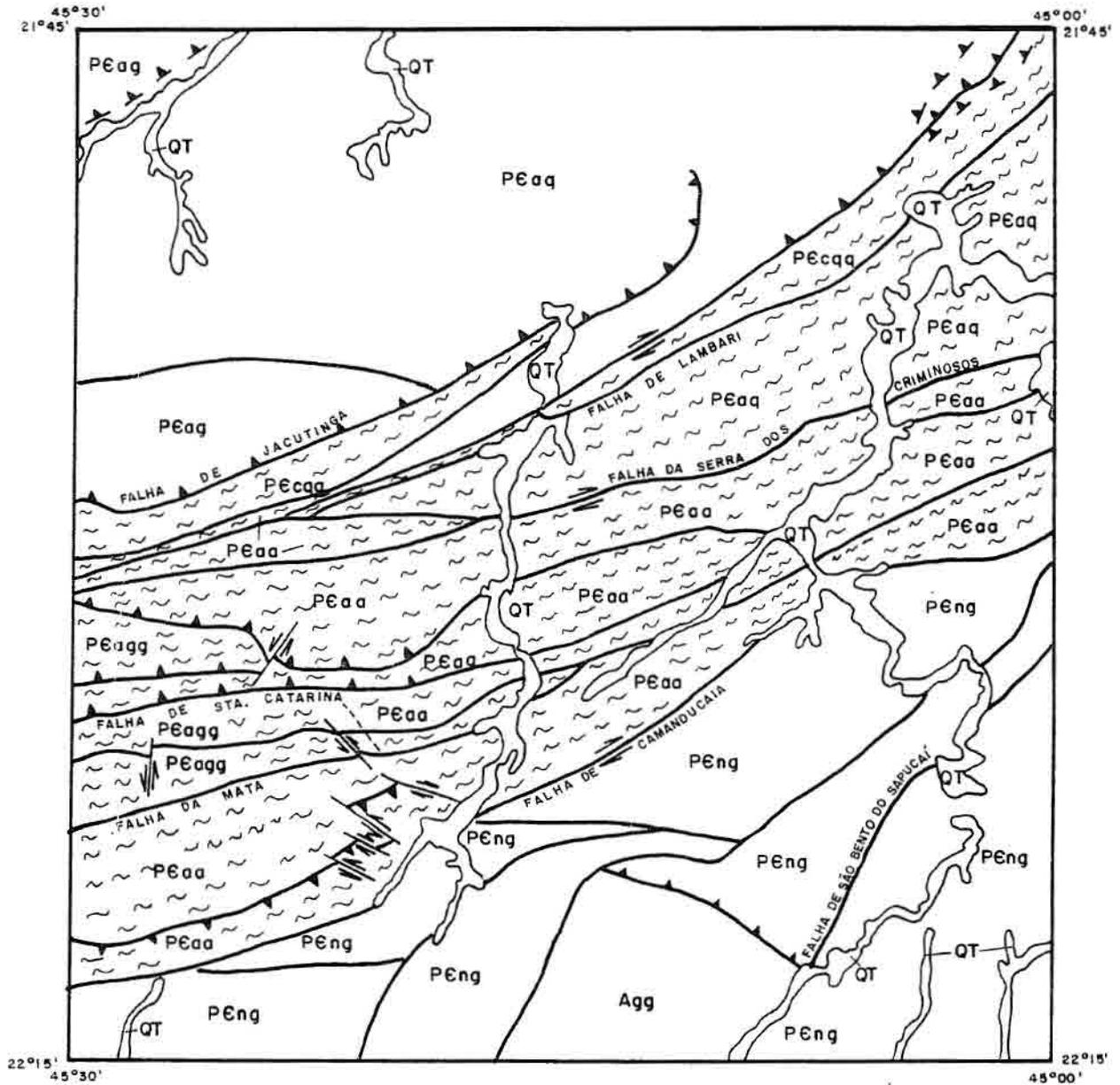
#### CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS

- A foliação milonítica neste setor possui orientação preferencial N60E com mergulho subhorizontal para noroeste, e está associada principalmente aos planos de falhas inversas/empurrões com caimentos para norte-noroeste (Fig. 4.22);



**SINAIS CONVENCIONAIS**

- RODOVIAS
- FERROVIAS
- ▨ ÁREA URBANA
- DRENAGEM
- AEROPORTO



## LEGENDA

ESCALA 1: 370 000

3,7 0 3,7 7,4 11,1 14,8 km

QT	Depósitos sedimentares aluviais
<b>Grupo Andrelândia</b>	
P&Eaaq	Quartzo-biotita-xistos com granada
P&Eaaqg	Milonito-gnaisses, gnaisses ofíticos
P&Eaa	Milonito-gnaisses, protomilonitos, cataclastos quartzitos, quartzo-biotita-xistos, associações gnaissico-granítica-migmatíticas
P&Eaaqg	Associações gnaissico-granítica-migmatíticas, milonitos, cataclásticas

<b>Grupo Carrancas</b>	
P&Eaaqg	Intercalações de quartzo-biotita-xistos com quartzitos, cataclásticas e milonitos
<b>Complexo Amparo</b>	
P&Eng	Associações gnaissico-granítica-anfibolítica-migmatíticas
<b>Complexo Guaxupé</b>	
Agg	Associações gnaissico-granítica-granítica-anfibolítica-charnokíticas e ultramáficas

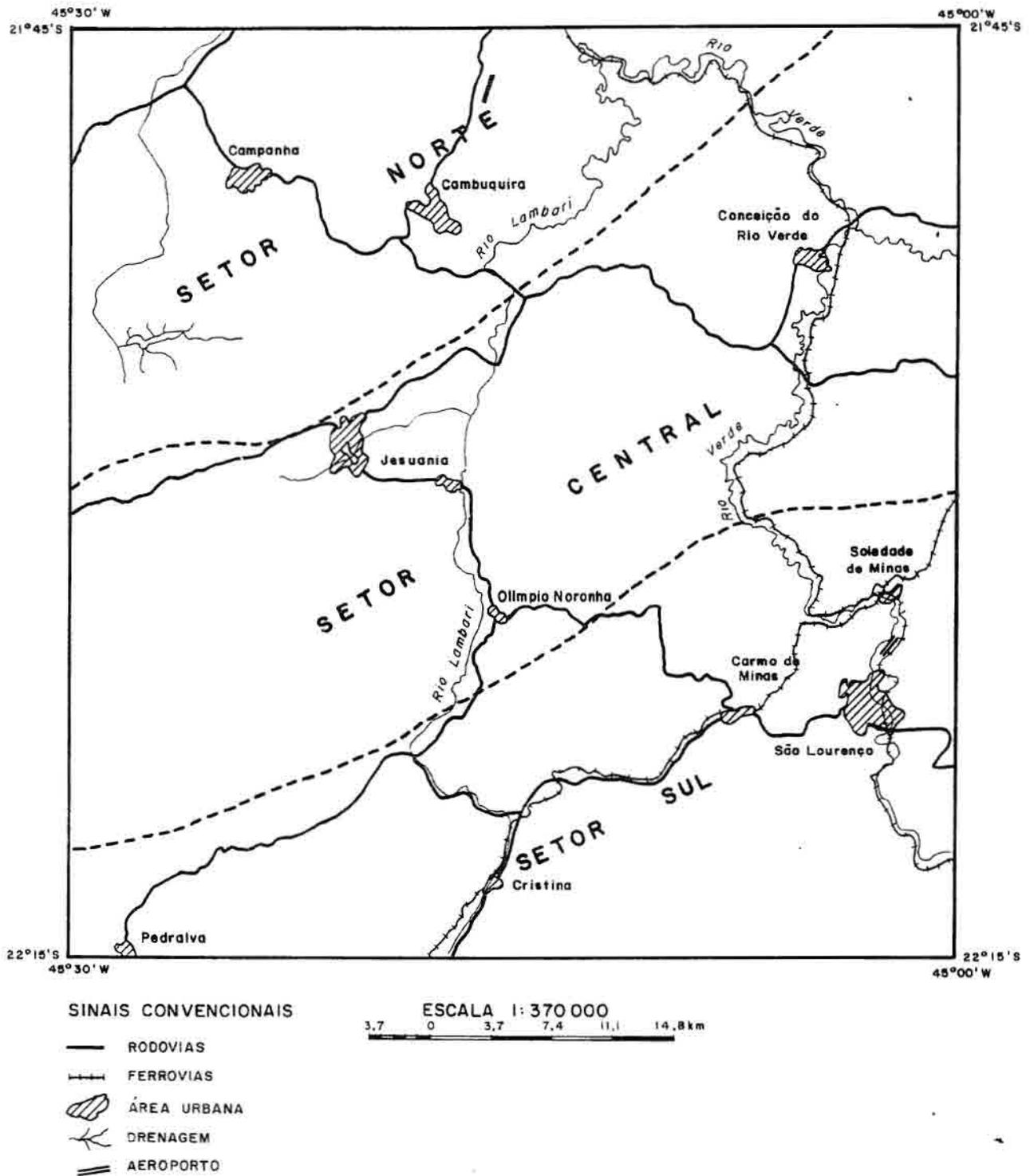
## Convenções Geológicas

—	Contato aproximado
≡	Falhas transcorrentes
▲	Falhas inversas/de empurrão
~	Foliação milonítica/cataclástica

Fig. 4.19 - Mapa litoestrutural da área de estudo baseado na análise das propriedades das feições lineares de relevo e drenagem e trabalho de campo.

Tab. 4.1 - Unidades litoestruturais definidas com base na fotointerpretação das propriedades das feições lineares e formas.

	Unidades litoestruturais	P <sub>eag</sub>	P <sub>eaq</sub>	Agg	P <sub>ecq</sub>	P <sub>ea</sub>	P <sub>eagg</sub>	P <sub>eng</sub>
Propriedades das formas	Densidade de drenagem	média a alta	baixa a média	média a alta	alta	média a alta	alta	média a alta
	Estruturação	definida	definida	definida	bem definida	definida	bem definida	definida
	grau de estruturação	médio	baixo	médio	muito alto	médio	médio a alto	médio
	ordem de estruturação	2º ordem dentrítica a retangular	2º ordem dentrítica a retangular	2º ordem dentrítica a retangular	3º ordem dentrítica a retangular	2º ordem dentrítica a retangular	2º ordem dentrítica a retangular	2º ordem dentrítica a retangular
Propriedades das feições lineares de relevo e drenagem	simetria	média assimetria	fraca assimetria	forte assimetria	sinétrico	média assimetria	média assimetria	média assimetria
	tropia	bidirecional preferencial	multidirecional ordenada	multidirecional ordenada	bidirecional preferencial	multidirecional ordenada	bidirecional preferencial	multidirecional ordenada
	Grau de uniformidade	médio	alto	médio	alto	médio	alto	médio
Zonas homólogas	Tipos litológicos	milonito-gnaisses, gnaisses ofálmicos e subord. quartzo-biotita-xistos com granada	quartzo-biotita-xistos com granada	associações gnaissico-granítica-granulítica-anfibolito-charnokíticas e ultramáficas	Intercalações de quartzo-biotita-xistos com quartzito cataclásticas, milonitos	milonito-gnaisses, protomilonitos, quartzito, quartzo-biotita-xistos, associações gnaissico-granítica-migmatíticas	Associações gnaissico-granítica-migmatítica, milonitos, cataclásticas	Associações gnaissico-granítica-granulítica-anfibolítica-migmatíticas,



4.20 - Divisão por setores estruturais elaborada em função das características litoestruturais obtidas nas imagens fotográficas e trabalho de campo.



Fig. 4.21 - Projeção estereográfica com os polos da lineação mineral com máximo 240-250/10° indicando a principal direção de cisalhamento na área de estudo com transporte das estruturas no sentido NE.

- As dobras são isoclinais, geralmente métricas, com eixos paralelos à foliação cataclástica possuindo atitudes N60-70E e mergulhos subhorizontais (Fig. 4.23).

- As maiores concentrações de juntas obtidas no campo estão associadas principalmente às direções N35-40W, N65-70W e E-W (Fig. 4.24). As duas últimas também coincidem com direções de eixos de máximos obtidas neste setor indicando associação entre essas estruturas.

- A maior concentração de zonas de juntas, observada no mapa de frequência de zonas de juntas, ocorre nas proximidades de Cambuquira (Fig. 4.10).

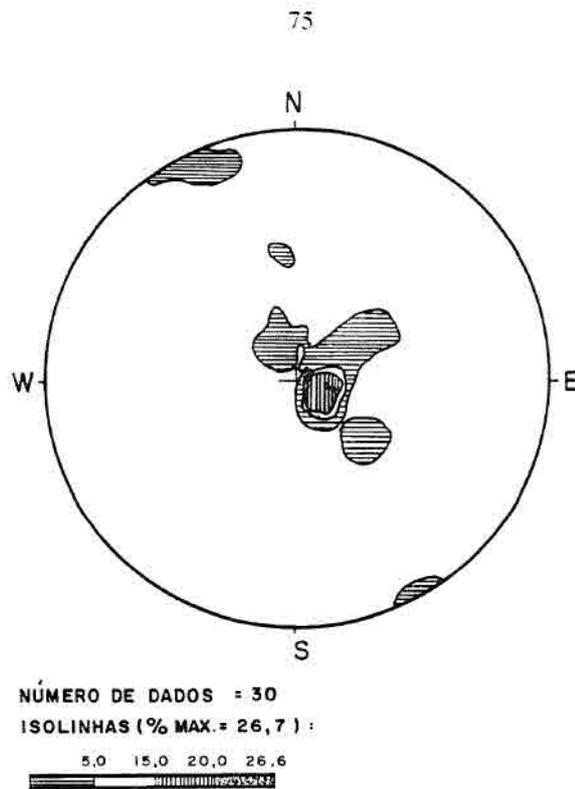


Fig. 4.22 - Projeção estereográfica indicando a direção preferencial dos polos da foliação milonítica no setor norte, N60E com mergulho subhorizontal para noroeste.



Fig. 4.23 - Dobra isoclinal com eixo subparalelo a foliação milonítica apresentando direção N60-70E, localizada nas proximidades de Cambuquira.

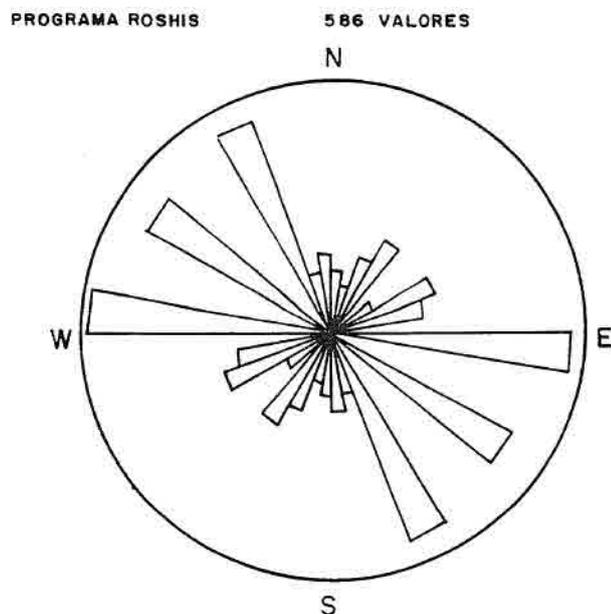


Fig. 4.24 - Roseta indicando freqüência de zonas de juntas obtidas no campo no setor norte, destacam-se as direções N35-40W, N65-70W e E-W.

#### 4.5.2 - SETOR CENTRAL

Representa uma faixa de cisalhamento de direção N65-70E, correlacionada à Faixa de Cisalhamento Ouro Fino (Cavalcante et al., 1979), localizada entre as Falhas de Jacutinga e Camanducaia; sua principal característica é a presença de fâihas inversas e de empurrões associadas à fâihas transcorrentes destrais.

Esta faixa abrange as unidades P<sub>ecqq</sub> do Grupo Carrancas (Ebert, 1971) formada por intercalações de quartzo-biotita-xistos com granada e unidades do Grupo Andrelândia (Ebert, 1956) compostas por (P<sub>εaa</sub>) associações gnaissico-granítica-migmatíticas, milonitos, cataclásticas e (P<sub>εagg</sub>) milonito-gnaisses,

protomilonitos, cataclasitos, quartzito, quartzo-biotita-xistos, associações gnaíssico-granítica-migmatíticas (Fig. 4.19).

## CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS

- A foliação milonítica ocorre paralelamente às bordas da zona de cisalhamento possuindo direção N60-70E e mergulhos verticais a subverticais indicando grande deformação cisalhante neste setor (Figs. 4.25 e 4.26);

- As dobras da foliação milonítica apresentam eixos verticais e são geralmente métricas (Fig. 4.27);

- As principais direções de zonas de juntas obtidas no campo orientam-se segundo N35-40W (Fig. 4.28). As maiores concentrações de zonas de juntas neste setor, representadas pelo mapa de isofrequência (Fig. 4.10), localizam-se nas proximidades de Lambari em associações gnaíssico-granítica-migmatíticas, miloníticas, cataclásticas.

- Neste setor predominam os lineamentos estruturais com direção E-W e N65-70E, evidenciados principalmente pelas foliações milonítica com estas direções (Fig. 4.19).

- Pelo mapa de eixos de máximos, observou-se que o controle da distribuição das zonas de juntas neste setor é exercido principalmente pela direção N65-70E (Fig. 4.17). E ainda, os principais eixos de máximos, localizados entre Lambari e Olímpio Noronha, coincidem com as direções das Falhas de Lambari e da Serra dos Criminosos (Fig. 4.19) indicando que estas falhas são antigas linhas de fraqueza que foram reativadas.

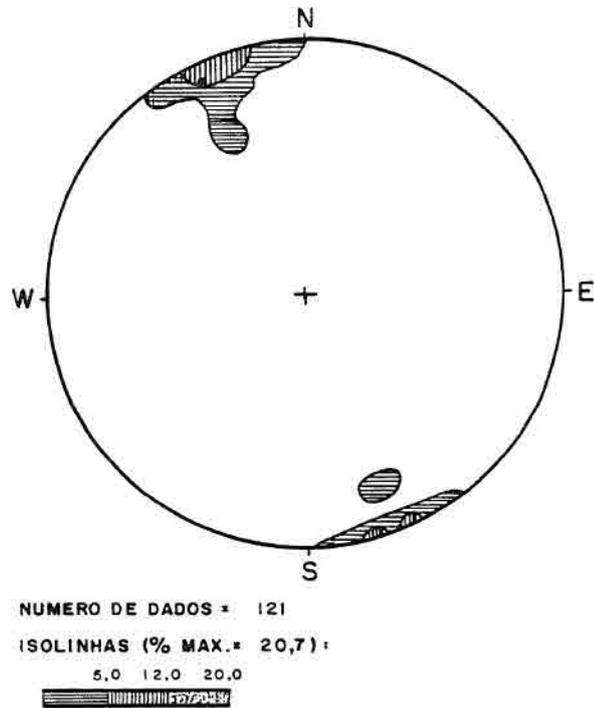


Fig. 4.25 - Projeção estereográfica indicando a direção principal dos polos da foliação milonítica no setor central, N70E/vertical a subvertical.



Fig. 4.26 - b) Foliação milonítica vertical com direção N70-80E, martelo indicando plano (proximidades de Jesuânia).

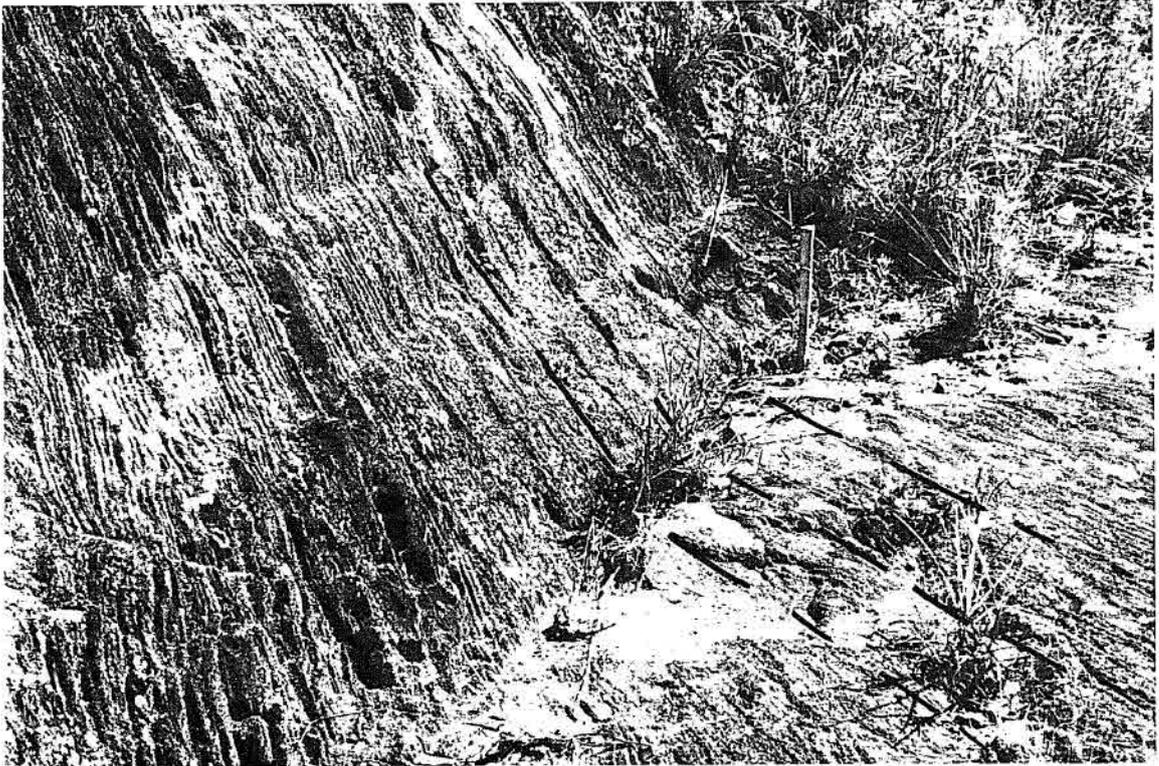


Fig. 4.27 - Dobra da foliação milonítica com eixo vertical presente na faixa de cisalhamento (setor central), atitude do plano axial E-W/vertical (próximo a Carmo de Minas).

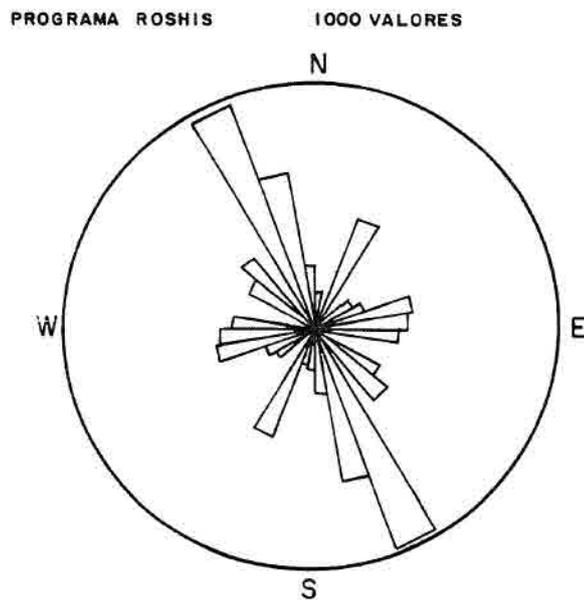


Fig. 4.28 - Roseta indicando direção preferencial de juntas obtidas no campo para o setor central, N35-40W.

#### 4.5.3 - SETOR SUL

Este setor compreende principalmente as associações gnaissico-granítica-granulítica-migmatítica-anfibolíticas do Complexo Amparo (Cavalcante, 1979) e Complexo Guaxupé (Artur e Wernick, 1984). Este último, diferenciado pelo maior aporte de rochas ultramáficas e charnokíticas junto às associações gnaissicas (Fig. 4.19).

#### CARACTERÍSTICAS ESTRUTURAIS

- A foliação milonítica apresenta direção preferencial N50E com mergulho variando de 50 a 90° SE, oblíqua à direção da zona de cisalhamento indicando diminuição da deformação cisalhante para o sul deste setor, onde aparecem as associações gnaissico-migmatíticas menos deformadas, ou seja com menos evidências de deformação rúptil como estrias e marcas de arrancadura (Fig. 4.29 e 4.30).

- As dobras de arrasto exibindo movimento dextral foram geralmente observadas ao longo dos planos de foliação milonítica com direção N65-70E (Fig. 4.4).

- As principais direções de juntas obtidas no campo foram N-S e N35-40W e N65-70E, as quais coincidem com a direção dos lineamentos estruturais obtidos neste setor (Fig. 4.31).

- As maiores concentrações de zonas de juntas estão localizadas a oeste de Cristina e sul de Carmo de Minas em unidades do Complexo Amparo e Grupo Andrelândia (Fig. 4.10).

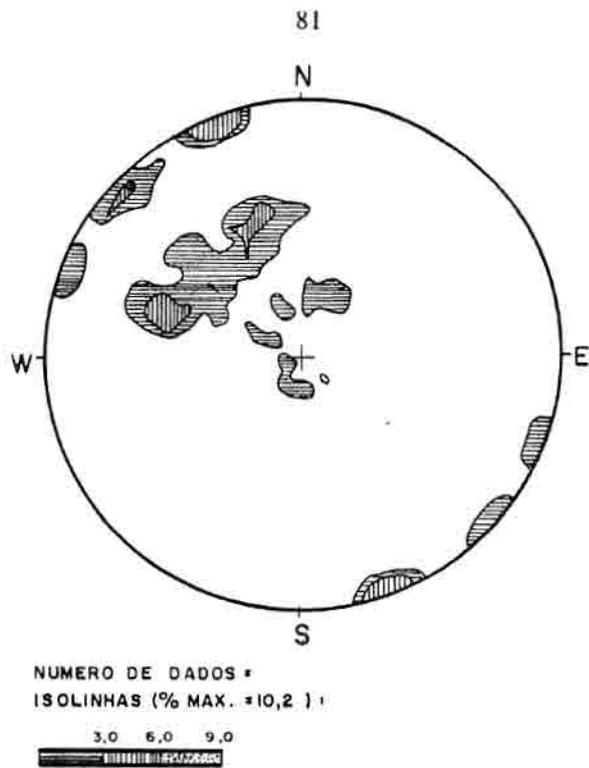


Fig. 4.29 - Projeção estereográfica indicando direção preferencial dos polos da foliação milonítica no setor sul, N50E com mergulhos variando de 50 a 90° SE.



Fig. 4.30 - Foliação milonítica mostrando porfiroclastos euédricos a subédricos de feldspatos rotacionados destalmente ao longo da direção N60E. (próximo à Soledade de Minas).

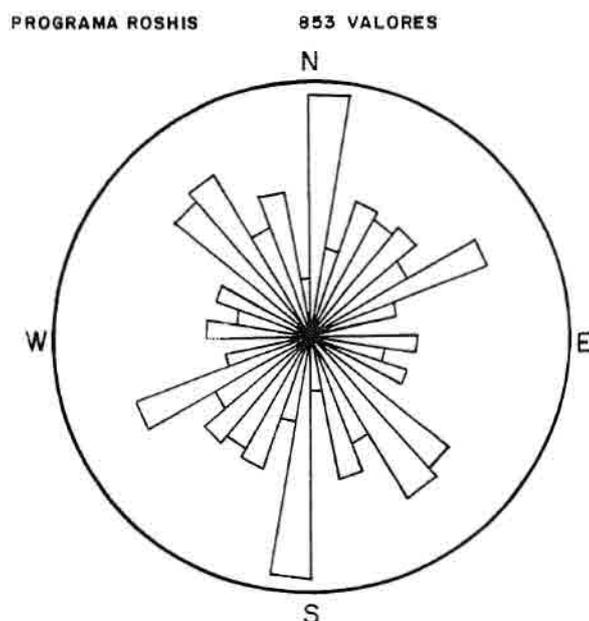


Fig. 4.31 - Roseta indicando direções preferenciais das juntas obtidas no campo para o setor sul, N-S, N35-40W e N65-70E.

- As direções de eixos de máximos de zonas de juntas N65-70E e N35-40W coincidem com as principais direções dos lineamentos estruturais verificados neste setor, indicando associação entre estas estruturas (Fig. 4.1 e 4.17).

#### 4.6 - CORRELAÇÃO ENTRE AS ESTRUTURAS E MODELOS DE DEFORMAÇÃO

A área de estudo encontra-se em um trecho curvo da zona de cisalhamento com estruturas transcorrentes, onde ocorreu arqueamentos convergentes lenticulares (Fig.3.4e) em níveis profundos da crosta e estruturas de deformação por cisalhamento simples e puro em níveis superiores.

O conjunto de evidências obtidas com a análise das estruturas geológicas, como movimentos ao longo dos lineamentos estruturais, dobras, foliações e lineações minerais, observados no campo e na imagem, indicaram que a área de estudo

foi alvo de esforços compressivos com direção NW-SE, responsáveis pela implantação de uma zona de cisalhamento transcorrente dúctil a rúptil de componente dextral. Tal deformação é fruto de processos de deformação progressiva que atuaram por longos períodos geológicos. Porém, não se obteve até o momento dados suficientes para se situar no tempo e espaço os fenômenos descritos. De concreto tem-se apenas que tanto as rochas infracrustais como as supracrustais foram afetadas pelos referidos processos de deformação.

Esta zona de cisalhamento, que provavelmente se estende por grandes áreas e profundidades, é a principal responsável pelos eventos polideformacionais observados na área de estudo. Apresenta estados de deformação dúctil intensa, acompanhada de deformação rúptil nos níveis superiores (Fig. 3.3). Estes estados de deformação estão evidenciados na área de estudo pelas características litoestruturais particulares observadas nos três setores estruturais, nos quais mostram um aumento gradativo do grau metamórfico de norte para sul, desde o facies xisto verde até o facies anfíbolito-granulito.

O estágio de transição destas deformações pode ser correlacionado ao modelo de Ramsay (1987), Figura 3.5, onde se verifica no setor sul o predomínio de estruturas de fluxo dúctil em rochas migmatíticas; passando para faixa de cisalhamento no setor central (dúctil-rúptil) e no setor norte desenvolvendo falhas inversa/empurrões nos metassedimentos (Grupo Andrelândia).

Durante a fase dúctil do cisalhamento com estruturas transcorrentes desenvolveram-se outras zonas de cisalhamento secundárias, as quais são representadas na área de estudo pelas direções N65-70E e N45-50E, que originaram as principais feições lenticulares que aparecem isolando unidades menos deformadas na região. Estas direções aparecem evidenciadas no campo, e nos mapas: de lineamentos estruturais, eixos de máximos, de condicionantes hidrogeológicos e litoestrutural (Figs. 4.1, 4.6, 4.17, 4.18, 4.19).

A faixa de cisalhamento na área de estudo corresponde à uma parte da lente com direção N65-70E. Nos seus limites desenvolveram-se intensa foliação milonítica-cataclástica e também rejeitos oblíquos com componentes inversas/normais e caimentos para NW, como observado a sul e norte de Lambari. E caimentos para SE, observados a oeste de Olímpio Noronha (Fig. 4.19).

As estruturas de fluxo como foliações miloníticas, dobras de arrasto e lineações minerais orientadas principalmente segundo a direção N60-70E, indicam que a direção principal do cisalhamento na área de estudo foi SW-NE (Figs. 4.20, 4.21, 4.22, 4.26, 4.28, 4.29).

Nos níveis superiores, onde predominou o cisalhamento de caráter rúptil, desenvolveram-se os fraturamentos que podem ser correlacionados ao modelo de Riedel (1929) e seu derivativo proposto por Sadowski (1983). Dessa forma os sistemas destrais E-W, N65-70E, N45-50E correspondem às estruturas R, Y e P; os sistemas sinistrais N35-40W e N-S às estruturas R' e X e os sistemas N65-70W às estruturas distensivas T.

No setor sul, onde ocorrem rochas gnaíssico-granítica-migmatítica-granulíticas, as características de deformações rúpteis (estrias de falhas, rochas cataclásticas, etc.) foram pouco evidenciadas. Predominando nessa região características da fase dúctil do cisalhamento progressivo como feições de arrasto (Fig. 4.4 e 4.22), rotação de minerais (Fig. 4.30), bandamentos miloníticos e foliações miloníticas/cataclásticas oblíquas à direção principal do cisalhamento (Fig. 4.29).

Durante a fotointerpretação das imagens, observou-se feições de arrasto ao longo das direções dos lineamentos estruturais que indicaram deslocamentos contrários aos obtidos durante o trabalho de campo, os quais sugeriram deslocamentos sinistrais para estes lineamentos (Fig. 4.32). Porém, considerando que estas estruturas foram observadas localmente nas imagens, principalmente no sul da área de estudo, optou-se pelo prevailecimento das análises de campo e das estruturas regionais

observadas na imagem, as quais indicam o cisalhamento com estruturas transcorrentes destras na área estudada.

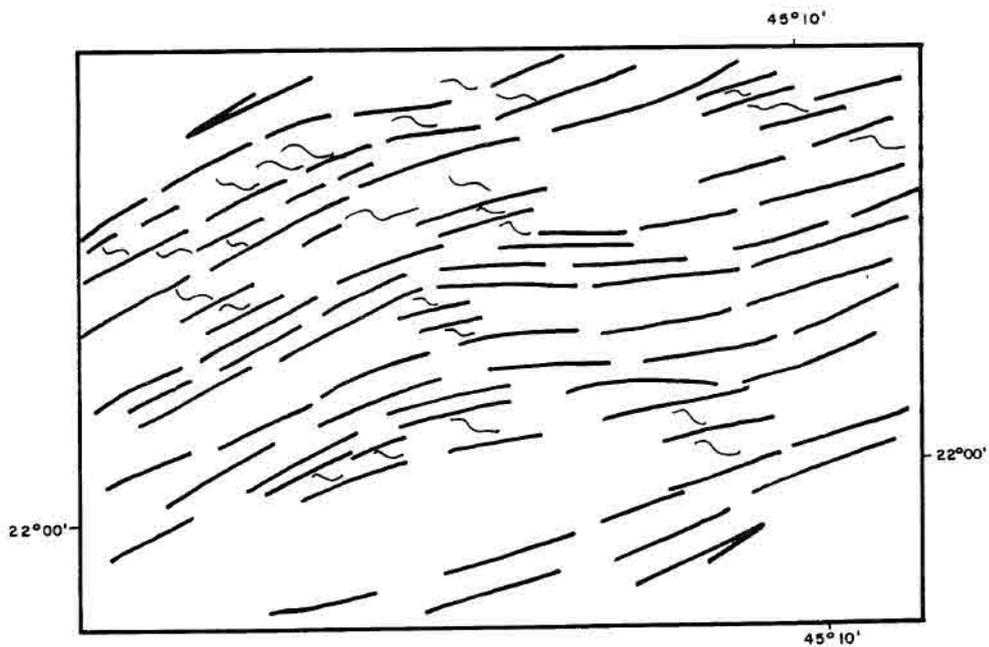


Fig. 4.32 - Feições lineares de relevo e drenagem obtidas na imagem fotográfica indicando arrasto sinistral de foliações ao longo das estruturas com direção N70E.

Estes deslocamentos sinistrais foram também observados por Machado e Endo (1994) na Zona de Cisalhamento Juiz de Fora-Jaguari-Taxaquara, nas proximidades ao sul da área de estudo (Fig. 2.3). Os autores acima, associaram estes movimentos como produtos de uma tectônica transpressiva sinistral imposta por um vetor compressivo com direção N-S ocorrida durante o Brasileiro.

Em tempos pós-Pré-cambrianos, ocorreu alívio de tensões formando os dobramentos flexurais e os conjuntos de zonas de juntas. Dessa forma, durante o processo de extensão crustal, teria ocorrido a movimentação vertical dos blocos ao longo das principais linhas de fraqueza dando origem aos dobramentos flexurais com eixos subhorizontais. Esses eixos apresentam na área de estudo as direções preferenciais N65-70E e N45-50E (Fig. 4.18). Este processo também contribuiu para o aparecimento de zonas de juntas diagonais, transversais e ou longitudinais ao longo dos eixos dos dobramentos flexurais e também as zonas de juntas orientadas segundo as direções das estruturas rúpteis de Sadowski (1983).

#### 4.7 - MAPA DE UNIDADES DE RELEVO

A área de estudo está inserida em dois grandes compartimentos geomorfológicos: Planaltos do Alto Rio Grande e Região da Mantiqueira Meridional (RADAMBrasil, 1983).

A Região da Mantiqueira Meridional compreende a área situada a leste de Pedralva, sul de Carmo de Minas e oeste de São Lourenço. As demais áreas fazem parte dos Planaltos do Alto Rio Grande, os quais abrangem a maior porção da área de estudo.

Nas formações superficiais da Região da Mantiqueira Meridional predominam os cambissolos, latossolos e solos podzólicos. Os Planaltos do Alto Rio

Grande são constituídos por latossolos vermelhos húmicos álicos, solos podzólicos vermelho-amarelos e cambissolos húmicos álicos (RADAMBRASIL, 1983).

As unidades de relevo da área de estudo, ou seja planícies, morros, serras e serrotes, caracterizadas a seguir, foram diferenciadas segundo cinco classes de declividade, ou seja entre 0 e 5%, 5-10%, 10-20%, 20-40% e >40% (Fig.4.33).

#### 4.7.1 - RELEVO COM DECLIVIDADE DE 0-5%

Representa a planície fluvial composta por material argilo-arenoso proveniente do recuo das vertentes compostas pelos vários tipos de rochas presentes na área de estudo (Tab. 6). Encontra-se geralmente ocupando vales retilíneos impostos pelos fraturamentos (falhas, fraturas ou zonas de juntas) exibindo principalmente orientação concordante com a estruturação NE e NW da região (Figs. 4.34 e 4.37). Apresentam altitudes que variam de 800 a 900 m.

#### 4.7.2 - RELEVO COM DECLIVIDADE DE 5-10%

Compreende os morros alongados com vertentes suaves. Estão localizados principalmente na porção norte da área de estudo, onde são controlados pela foliação subhorizontal presente em quartzo-biotita-xistos com granada (Peaq). Na porção sudeste da área, este relevo está associado principalmente aos fraturamentos que aumentam o grau de erodibilidade das associações gnaíssico-granítica-migmatítica-anfibolíticas (Peng, Agg) pelos processos de desagregação mecânica e química. As altitudes variam de 900 a 1000 m (Figs. 4.35, 4.36, 4.37).

#### 4.7.3 - RELEVO COM DECLIVIDADE DE 10-20%

Constituem os morros com vertentes suaves, perfis côncavo-convexos apresentando moderada resistência a erosão. Localizam-se principalmente na porção

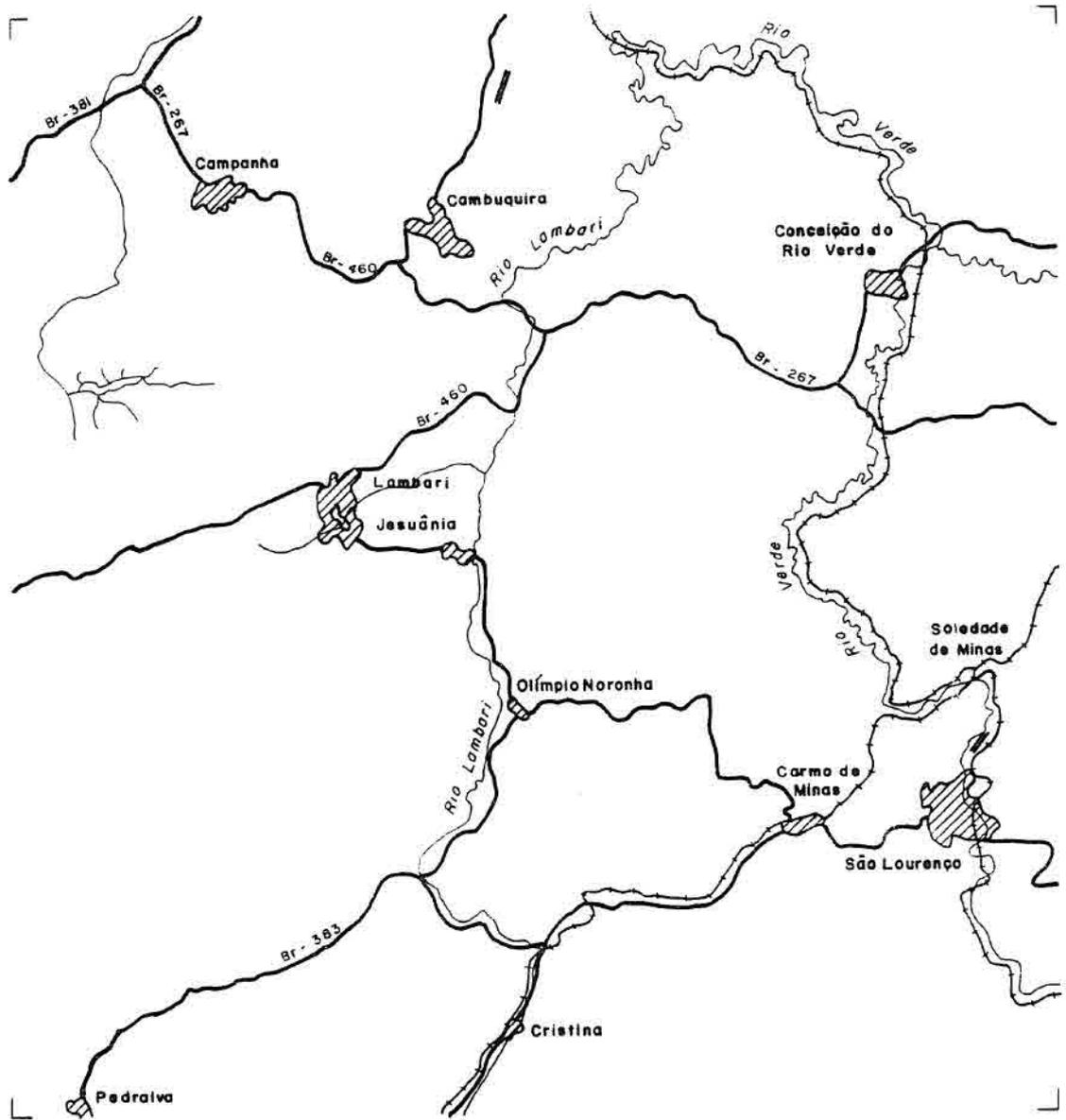
oeste da área de estudo em quartzo-biotita-xistos com granada (P<sub>eq</sub>) e associações gnaissico-granítica-migmatítica-anfibolíticas (P<sub>ea</sub>, P<sub>ag</sub>, P<sub>ng</sub>). Apresentam altitudes que variam de 900 a 1100 m (Fig. 4.34).

#### 4.7.4 - RELEVO COM DECLIVIDADE DE 20-40%

Compreende os serrotes e serras com perfis côncavo-retilíneo-convexos e longas escarpas impostas por associações de falhas direcionais e empurrão/inversas constituindo relevos de moderada a forte resistência a erosão. Apresentam cristas geralmente assimétricas com orientação geral NE, as quais são constituídas por sequências de morros com cristas orientadas para NW. Este relevo abrange a maior parte da área ocorrendo principalmente na porção centro-oeste em quartzo-biotita-xistos/quartzitos (P<sub>ecq</sub>), associações gnaissico-granítica-migmatítica-anfibolíticas e cataclásticas (P<sub>agg</sub>, P<sub>ea</sub>, Agg, P<sub>ng</sub>, P<sub>ecq</sub>). Apresentam altitudes entre 1000 e 1400 m (Figs. 4.36 e 4.37).

#### 4.7.5 - RELEVO COM DECLIVIDADE >40%

Este relevo é caracterizado por escarpas de falhas impostas por falhas direcionais e inversas/empurrões e esparsos esporões com vertentes íngremes e lisas, de rochas gnaissicas-graníticas. As escarpas formam as extensas serras com direção NE, localizadas ao norte de Lambari em rochas quartzo-biotita-xistos/quartzito (P<sub>ecq</sub>) e a oeste de Olímpio Noronha em associações gnaissico-granítica-migmatítica-migmatítica-charnokíticas (P<sub>agg</sub>, P<sub>ea</sub>, Agg). Apresentam altitudes que variam de 1000 e 1800 m (Figs. 4.38, 4.39).



**SINAIS CONVENCIONAIS**

- RODOVIAS
- FERROVIAS
- ▨ ÁREA URBANA
- DRENAGEM
- AEROPORTO

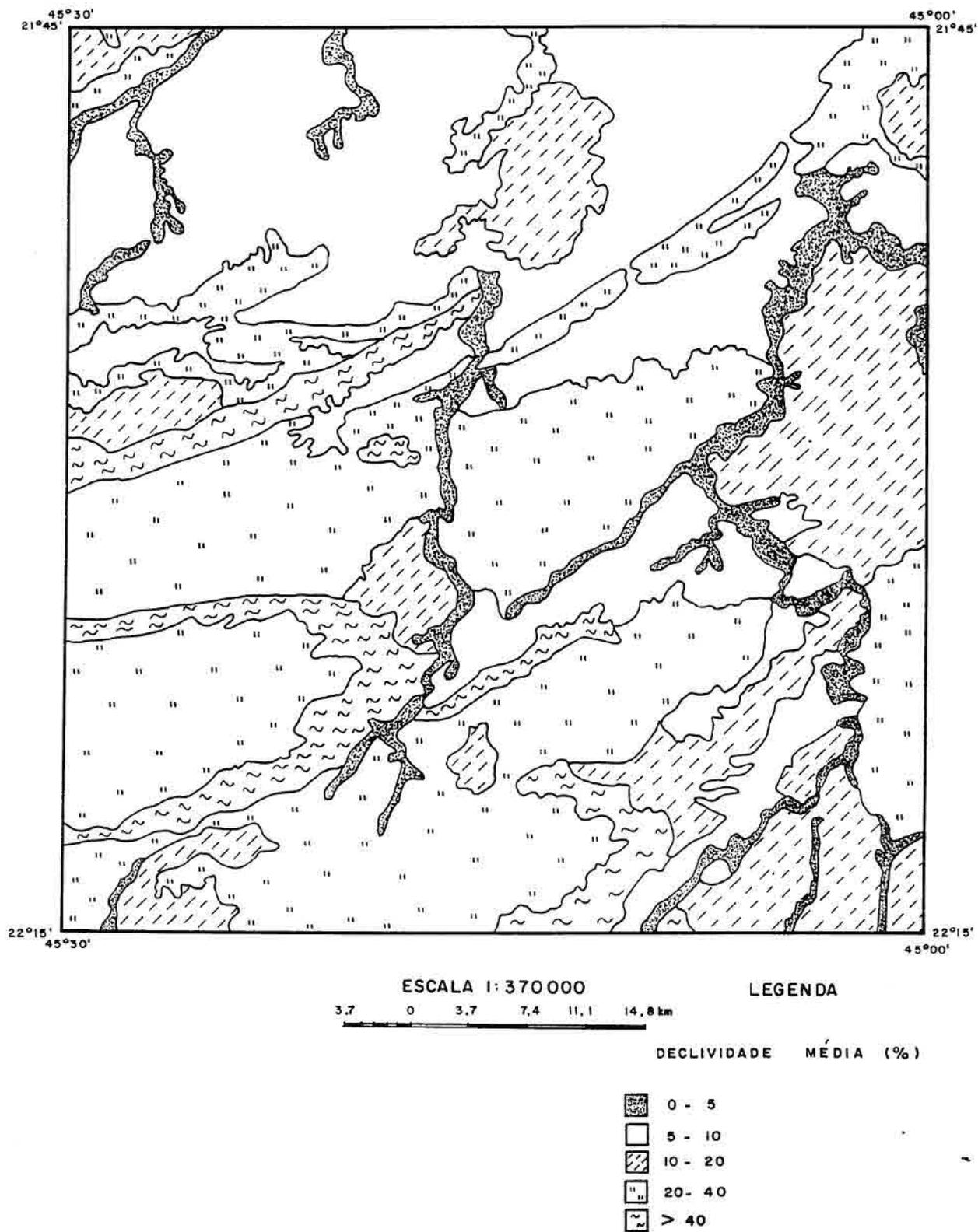


Fig. 4.33 - Mapa de unidades de relevo e classes de declividade associadas.



Fig. 4.34 - Vista panorâmica da planície do Rio Verde com declividade de 0-5% a frente e relevos côncavo-convexos com declividade de 10-20% ao fundo (próximo à São Lourenço)

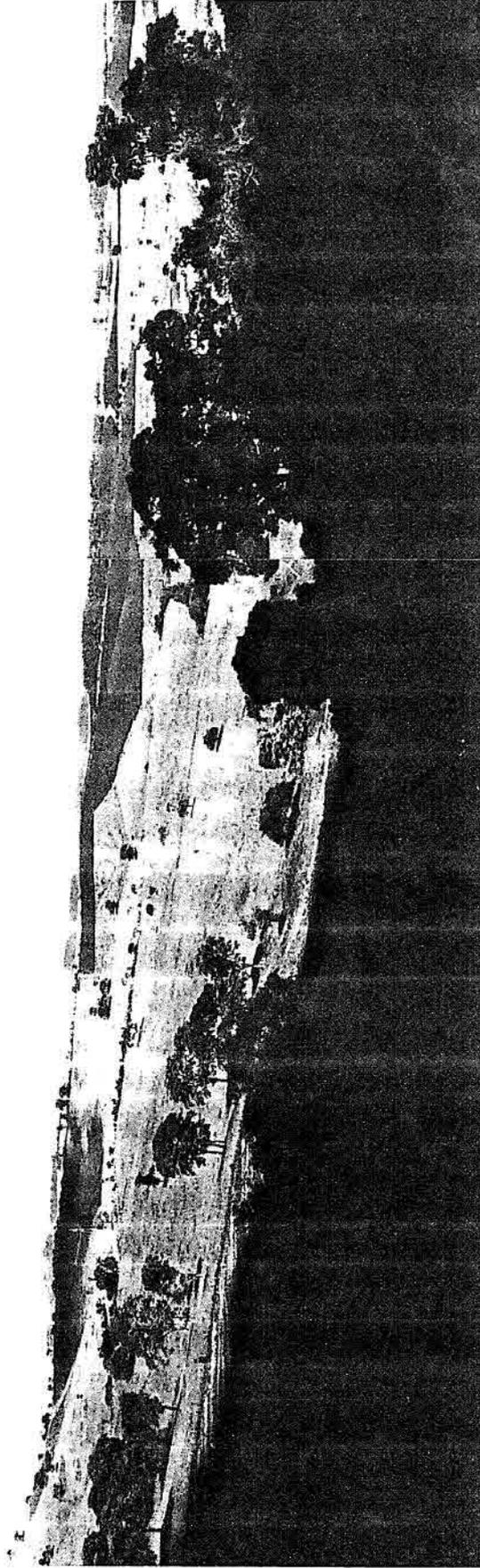


Fig.4.35 - Vista panorâmica do relevo de morros alongados com vertentes suaves (declividade 5-10%) desenvolvidos em xistos com foliações subhorizontais ao norte de Cambuquira.

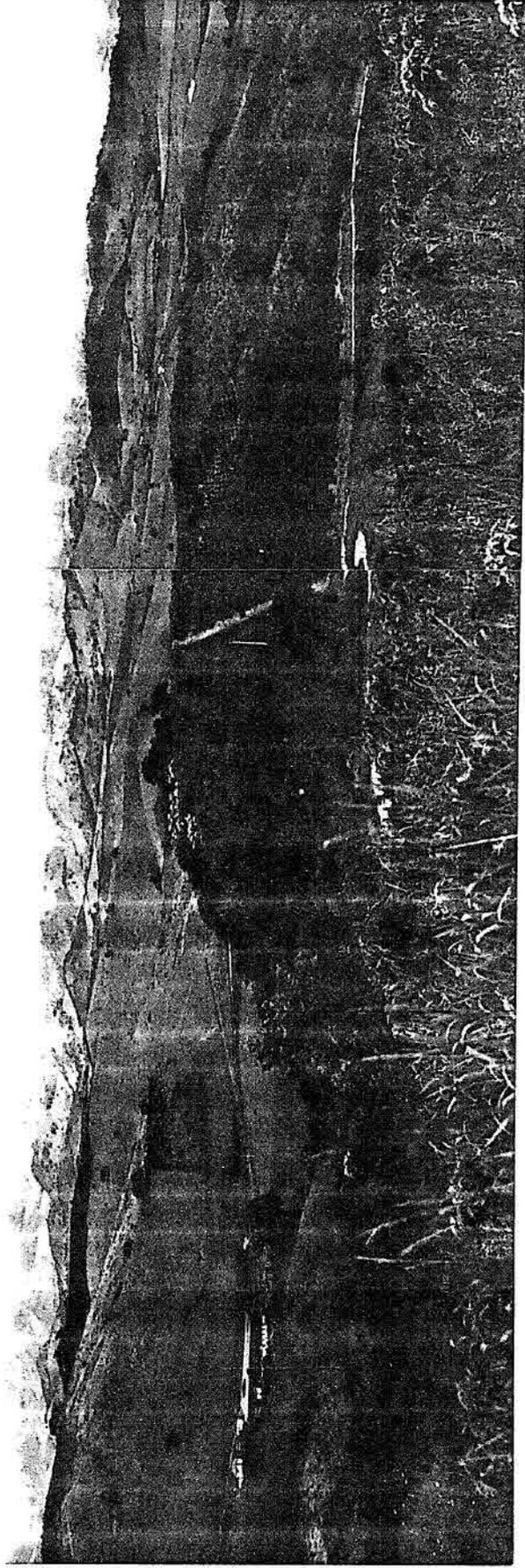


Fig. 4.36 - Vista panorâmica mostrando à frente, relevo de morros alongados com vertentes suaves (declividade 5-10%) e ao fundo relevos com perfis côncavo-retilíneo-convexos (declividade 20-40%). Próximo à Br 381, extremo noroeste da área de estudo.



Fig. 4.37 - Vista panorâmica mostrando em primeiro plano a planície do Rio Lambari (declividade 0-5%) e em segundo plano à direita, a Serra de São Domingos e Bocaína (Leste de Lambari) com perfis côncavo-retilíneo-convexos (declividade 20-40%).



Fig. 4.38 - Plano de falha inversa (declividade  $>40\%$ ) compondo a Serra da Pedra Branca com vertentes apresentando atitude N70E/55SE desenvolvidos em milonito-gnaisses.

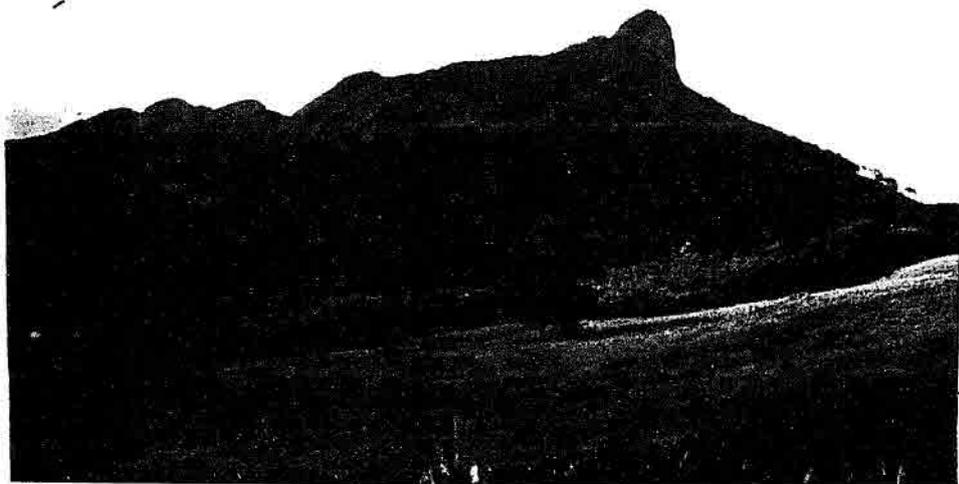


Fig. 4.39 - Serra da Pedra Branca mostrando corpo gnaiss-granítico (tipo pão de açúcar) tombado para SE segundo a escarpa de falha inversa/empurrão (declividade  $>40\%$ ).

#### 4.8 - INTEGRAÇÃO DOS DADOS

Nesta fase foram integrados os resultados obtidos da análise dos fraturamentos, litotipos, morfoestruturas e relevo visando contribuir para o conhecimento dos sistemas aquíferos da região estudada.

Nos mapas elaborados (mapas de isofrequência e eixos de máximos de zonas de juntas, mapas de lineamentos estruturais, de condicionantes hidrogeológicos, e de unidades de relevo) foram considerados os principais aspectos que contribuem para o armazenamento de água subterrânea pelos fraturamentos.

Pela análise do mapa de lineamentos estruturais (Fig.4.1) e sua correlação com as estruturas do modelo de Sadowisk (1983) (derivativo do modelo de Riedel (1929)), observou-se que na área de estudo a principal direção das fraturas distensivas é N65-70W, porém estas estruturas parecem pouco influenciar no armazenamento de água subterrânea na região. Para a integração, neste mapa considerou-se que todas as falhas foram reativadas, e portanto, os seus cruzamentos podem prover quantidades razoáveis de água.

No mapa de Isofrequência de zonas de juntas (Fig. 4.10) foram consideradas apenas as curvas de isofrequências moderadas (32-40%) e as altas (>40%) para a integração dos dados por indicarem as maiores permeabilidades secundárias e conseqüentemente as áreas mais propícias para contribuir com o armazenamento de água subterrânea na região.

No mapa de eixos de máximos (Fig. 4.17) pode-se considerar que estes eixos indicam antigas linhas de fraqueza, portanto, nas suas interseções ocorrerá uma alta densidade de zonas de juntas e conseqüentemente um aumento da permeabilidade secundária. Porém, como os eixos de máximos estão inseridos nas áreas de maior concentração de zonas de juntas, ou seja, geralmente aquelas áreas que apresentam

curvas de isofrequência com valores superiores a 32%, optou-se por considerar apenas o mapa de isofrequência de zonas de juntas para a integração.

No mapa de condicionantes hidrogeológicos (Fig. 4.18), pode-se observar que as falhas que definem o arcabouço estrutural da área de estudo, ou seja aquelas com direções N45-50E e N65-70E, foram as principais estruturas reativadas por movimentos verticais. Estes movimentos, evidenciados no campo através de extensas escarpas de falhas inversas e falhas direcionais, possivelmente originaram os dobramentos flexurais que configuram os altos e baixos estruturais, os quais servem de trapas para a água subterrânea. Dessa forma, as estruturas (zonas de juntas e falhas) mais propícias à acumulação de água subterrânea são aquelas cujas interseções encontram-se próximas aos limites das linhas de contorno estrutural, ou seja nas partes mais baixas dos blocos basculados (baixo estrutural). Para a integração, os baixos estruturais foram considerados como uma fator importante para a determinação das estruturas favoráveis à captação de água subterrânea, enquanto os altos estruturais para a indicação das áreas de recarga.

No mapa litoestrutural (Fig. 4.19) pôde-se observar que os litotipos apresentam características distintas em relação à permeabilidade.

No setor norte, onde predominam os quartzo-biotita-xistos ricos em argilominerais, o intemperismo físico-químico contribui para impermeabilizar o solo e os fraturamentos. Provavelmente, nesta região as maiores vazões estariam nos contatos destas rochas com seu embasamento. E, sua principal área de recarga seriam as extensas escarpas de falha inversa/empurrões situados a norte de Lambari e Conceição do Rio verde.

No setor central as rochas miloníticas que compõem as estensas escarpas de falhas, contribuem para a diminuição da circulação de água subterrânea, aprisionando-a ao longo das estruturas com direção NE.

No setor sul, predominam as associações gnaissico-granítica-granulítica-migmatíticas com estruturas de fluxo e apresentando menor evidência de deformação dútil, o que provavelmente contribui para o desenvolvimento de fraturas mais fechadas.

A partir das características do relevo é possível inferir alguns aspectos em relação ao escoamento de água superficial de fluxo rápido (água de chuva) proveniente das áreas mais elevadas que se dirige em direção às áreas de baixas altitudes. Dessa forma, foram consideradas as áreas com altitude entre 900 e 1100m, as quais correspondem no mapa de unidades de relevo àquelas áreas com declividade inferior a 10%, como sendo as áreas mais favorecidas por contribuições do escoamento superficial que se dirige para o nível de base e se infiltra pelos solos, saturando-o e percolando os fraturamentos (juntas e falhas).

Para a determinação das áreas de maior favorabilidade de prospecção de água subterrânea foram integrados os planos de informação referentes às falhas (Mapa de lineamentos estruturais), zonas de juntas (Mapa de isofrequência de zonas de juntas) e morfoestruturas (mapa de condicionantes hidrogeológicos), conforme discriminados na Tabela 4.2.

Nesta tabela as áreas de alta favorabilidade são aquelas que estão em baixos estruturais, apresentam interseção de lineamentos regionais e alta frequência de zonas de juntas.

As áreas de moderada a alta favorabilidade, estão localizadas em baixos estruturais, apresentam interseção de lineamentos regionais e moderada frequência de zonas de juntas.

As áreas de moderada favorabilidade, estão situadas em baixos estruturais, apresentam interseção de lineamentos regionais ou moderada a alta frequência de fraturamento.

E as áreas de baixa favorabilidade, estão localizadas em locais de transição alto-baixo estrutural, interseção de lineamentos regionais ou moderada a alta frequência de fraturas.

Tab. 4.2 - Integração dos planos de informação para classificação de áreas favoráveis à prospecção de água subterrânea.

Integração dos planos de Informação	Classificação das áreas favoráveis a mapeamentos de detalhe	Alta	moderada a alta	moderada	baixa
Mapa de Condicionantes Hidrogeológicos	Baixo estrutural				
	Transição Alto -Baixo estrutural				
Mapa de Isofrequência de Zonas de Juntas	32 - 40%				
	> 40%				
Mapa de Lineamentos Estruturais	Interseção de lineamentos estruturais				

Na Figura 4.40 foram representadas as áreas de alta e moderada a alta favorabilidade de captação de água subterrânea e as principais áreas de recarga dos aquíferos da região.

Para a identificação das áreas de recarga foram consideradas as regiões localizadas em altos estruturais que apresentaram alta e moderada a alta frequência de

zonas de juntas e/ou interseção de lineamentos estruturais. Entre Olímpio Noronha e Lambari foram também selecionadas as áreas localizadas em transição baixo-alto estrutural que apresentaram moderada a alta frequência de zonas de juntas e lineamentos estruturais.

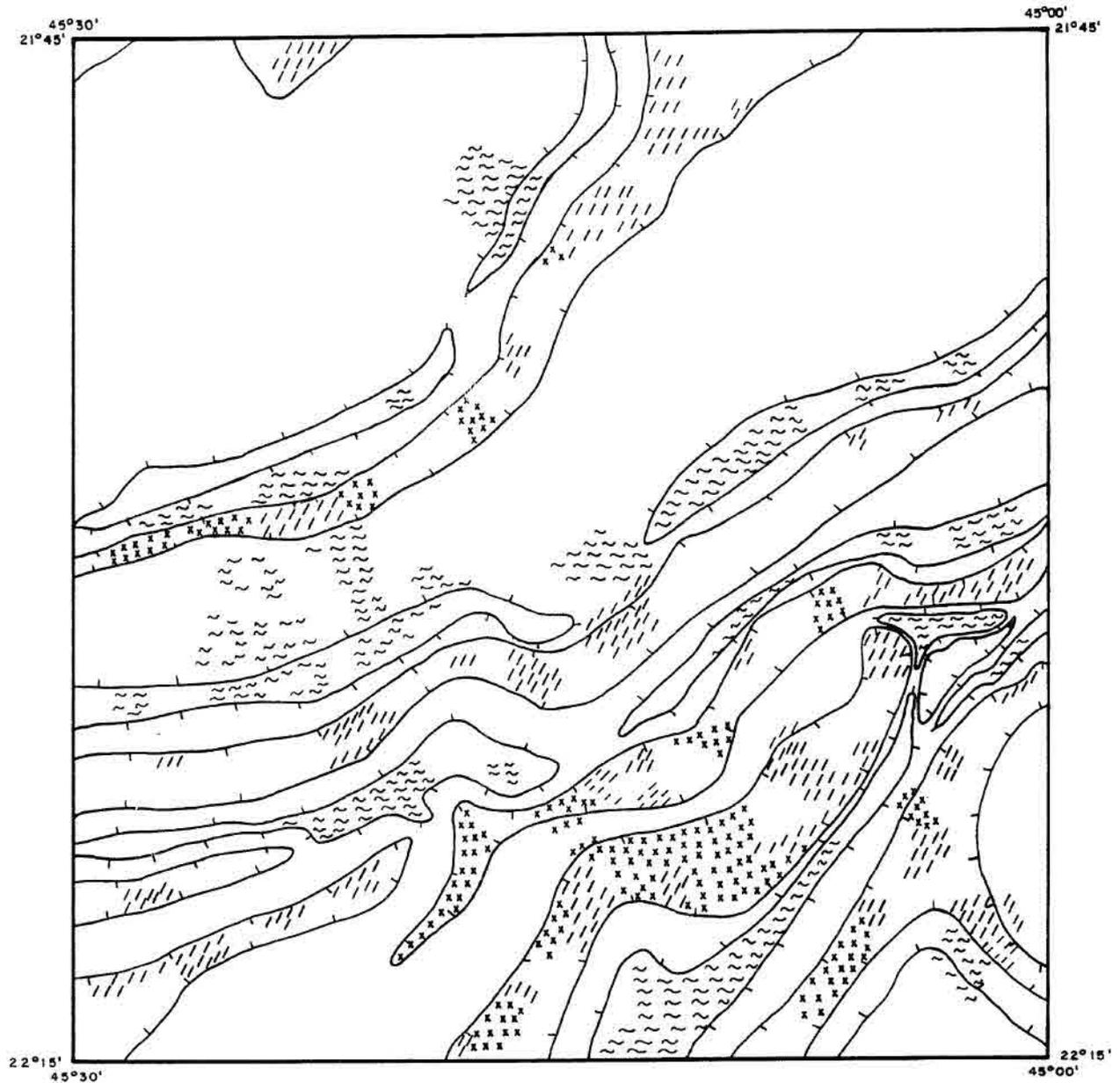
Pela integração dos mapas temáticos, as principais áreas classificadas como de moderada a alta e alta favorabilidade para prospecção de água subterrânea, representadas na Figura 4.40, ocupam as áreas com altitude entre 900 e 1100m em unidades do Grupo Andrelândia (P<sub>εaa</sub>) e Complexo Amparo (P<sub>εng</sub>), estando localizadas em Lambari e a nordeste desta região; a noroeste de Soledade de Minas e a sudoeste de São Lourenço.

Secundariamente, aparecem outras áreas com maior extensão ocupando estreitos vales entre altitudes de 1000 e 1400m, constituídas por unidades do Complexo Amparo (P<sub>εng</sub>) e Complexo Guaxupé (Agg), as quais ocupam principalmente a região situada a norte e oeste de Cristina e oeste de Lambari.

Em relação à localização das estâncias hidrominerais de Lambari, Cambuquira e São Lourenço verificou-se que:

1) Lambari situa-se no pé da Serras das Águas, com altitudes entre 900 e 1000 m, em baixo estrutural, sendo interceptada por lineamentos estruturais com direção N70E com N35-40W e localizada em áreas de moderada frequência de zonas de juntas. Considerando a Tabela 4.2, esta região encontra-se numa área de moderada a alta favorabilidade ao armazenamento de água.

Em Lambari, os sistemas aquíferos sofrem forte influência das estruturas com direção N70E (Falha de Lambari) que agem como trapas para o armazenamento de água subterrânea ao longo das escarpas de falhas verticalizadas compostas por rochas miloníticas.



ESCALA 1: 370 000

LEGENDA

3,7 0 3,7 7,4 11,1 14,8 km

ÁREAS FAVORÁVEIS À PROSPECÇÃO  
DE ÁGUA SUBTERRÂNEA

☒ ALTA E MODERADA A ALTA

▨ MODERADA

ÁREAS FAVORÁVEIS À RECARGA DE  
ÁGUA SUBTERRÂNEA

☞ ALTA E MODERADA A ALTA

Fig. 4.40 - Mapa de áreas favoráveis à mapeamentos de detalhe visando prospecção de água subterrânea e áreas de recarga visando a preservação dos aquíferos fraturados.

Pela assimetria de drenagem, indicada nas linhas de contorno estrutural (Fig.4.31), verifica-se que a tendência do escoamento de água subterrânea, proveniente das áreas de recarga situadas ao sul de Lambari, é se orientar em direção norte e depois paralelamente à estruturação N70E.

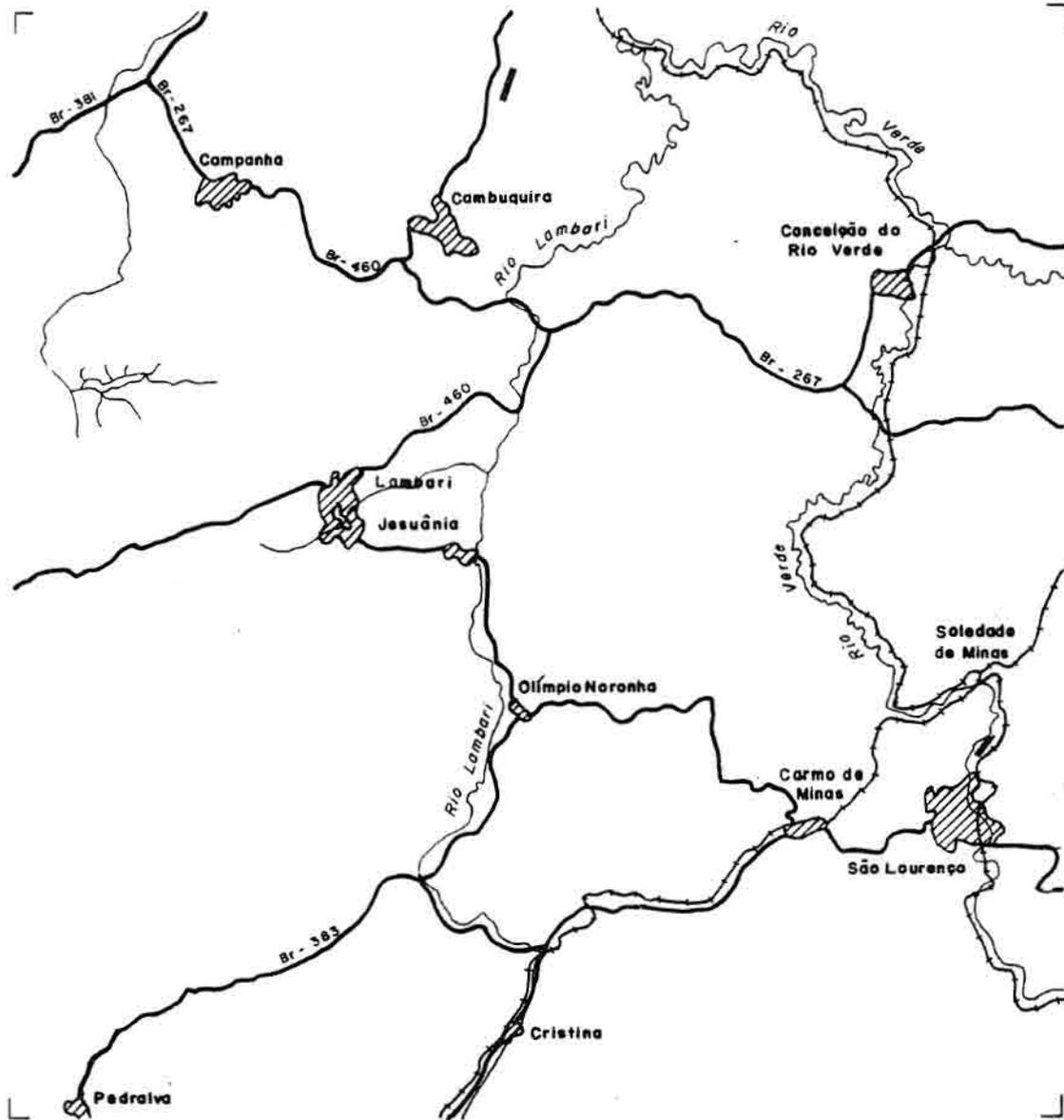
Pelas características do relevo, Lambari encontra-se em altitudes entre 900-1000 m, encaixada em um vale que recebe escoamento de fluxo rápido (água de chuva) proveniente das áreas de altitudes entre 1000 e 1400 m, localizadas a norte e sul, contribuindo para o armazenamento de água pelas estruturas com direção N70E.

2) São Lourenço, região constituída por associações gnaíssicas-graníticas-migmatíticas do complexo Amparo (Peng), situa-se em baixo estrutural, com altitudes entre 800 e 900 m, sendo interceptada por sistemas de lineamentos estruturais com direção N35-40W e N45-50E, porém se encontra em área de baixa frequência de fraturamento. Foi considerada pela Tabela 4.2 como área de moderada favorabilidade.

Pelas características observadas, nota-se que o controle estrutural dos aquíferos nesta região é fortemente influenciado pela direção N45-50E. As estruturas nesta direção seriam os trapas para o fluxo de água subterrânea proveniente das áreas de recarga situadas principalmente a sudeste (em altitudes entre 1000 e 1400m), que se orientam para o baixo estrutural localizados nos relevo de baixa altitude (entre 800 e 1000 m) ao sul de São Lourenço.

São Lourenço também encontra-se encaixada em uma vale recebendo contribuições do escoamento de fluxo rápido (água de chuva) de leste, oeste e sul.

3) Cambuquira, região constituída por rochas quartzo-biotita-xistos com granada; localizada em área de moderada a alta frequência de zonas de juntas, com altitude entre 900 e 1000m; situa-se em área de transição alto-baixo estrutural, também sofrendo



**SINAIS CONVENCIONAIS**

- RODOVIAS
- FERROVIAS
- ▨ ÁREA URBANA
- DRENAGEM
- AEROPORTO

influência de falhas com direção N35-40W e N45-50E, foi considerada pela Tabela 4.2 como área de moderada favorabilidade.

Em Cambuquira, os sistemas aquíferos são influenciados pela alta concentração de zonas de juntas e eixos de máximos que se interceptam nas proximidades ao norte desta região. Acredita-se também que outra influência imposta aos aquíferos da região seja os planos de falhas inversas/empurrões com caimentos para N-NW, os quais são indicados também pela simetria das curvas de contorno estrutural.

#### 4.9 - DADOS DE POÇOS TUBULARES

Apenas foram obtidos 18 dados de vazão de poços tubulares junto às sedes dos órgãos governamentais do estado de Minas Gerais e empresas de perfuração de poços localizados em Belo Horizonte, os quais foram discriminados na tabela 4.3.

Tab. 4.3 - Localidades, número de poços e vazão média.

FONTE: Adaptada de Copasa (1978) pgs. 81, 82, 105, 358, 370.

Localidades	Nº de poços profundos	Vazão Média (l/s)	Capacidade específica média (l/s.m)	Profundidade média (m)
São Lourenço	8	2.392	0,10575	74,0
Cambuquira	3	4.219	0,1930	49,0
Soledade de Minas	1	0.995	0,0830	40,0
Conceição do Rio Verde	2	2.774	0,1955	88,8
Campanha	4	1.276	0,2035	52,14

Analisando os dados de vazão média das localidades acima e comparando com os critérios de favorabilidade de prospecção estabelecidos na tabela 4.2 constatou-se que:

- Cambuquira apresenta os maiores valores de vazões de poços apesar de ter sido classificada pela Tabela 4.2 como de baixa favorabilidade. Nesta região os sistemas aquíferos são influenciados pela alta concentração de zonas de juntas e ou contato dos metassedimentos do Grupo Andrelândia com seu embasamento.

- Conceição do Rio Verde, com valores de vazões moderadas, foi classificada pela Tabela 7 como de baixa favorabilidade. Esta região localiza-se em área de transição baixo-alto estrutural, altitudes entre 800 e 900m e baixa frequência de zonas de juntas. O principal controle dos aquíferos nesta região é exercido pelos lineamentos regionais com direção N45-50E.

- São Lourenço, apresenta valores de vazões razoáveis, pela tabela como de moderada favorabilidade. Esta região, como referenciada no item 5.9, situa-se em baixo estrutural, altitudes entre 800 e 900m, intersecção de lineamentos regionais N45-50E e N35-40W e baixa frequência de fraturamento. O controle estrutural dos aquíferos é fortemente influenciado pela direção N45-50E.

- Campanha, com baixas vazões, localiza-se em área de transição baixo-alto estrutural, altitudes entre 900 e 1100m, em área de baixa frequência de zonas de juntas, situa-se em área classificada pela tabela 4.2 como de baixa favorabilidade. O principal controle dos aquíferos nesta região é exercido pela estruturação N45-50E e provavelmente também pelo contato dos metassedimentos do Grupo Andrelândia com seu embasamento.

- Soledade de Minas, apresenta baixos valores de vazão, pela Tabela 4.2 esta região situa-se em área de moderada favorabilidade por localiza-se em baixo estrutural, apresentar altitudes entre 900 e 1100m e moderada frequência de zonas de juntas.

Embora dois dos resultados acima (para São Lourenço e Campanha) mostrem correlações favoráveis com a classificação elaborada na Tabela 4.2, torna-se necessário um maior número de dados de poços tubulares para resultados mais significativos a título de comparação.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES

- A área de estudo foi alvo de esforços compressivos com direção NW-SE responsáveis pela implantação de uma zona de cisalhamento com estruturas transcorrentes destrais com direção NE-SW. As principais estruturas dúcteis nesta zona de cisalhamento progressivo apresentam direções N65-70E e N45-50E e representam as principais direções das lentes de cisalhamento na área de estudo. As principais estruturas rúpteis na área de estudo podem ser correlacionadas às do modelo de Riedel (1929) adaptado por Sadowisk (1983), assim as falhas direcionais destrais E-W, N65-70E e N45-50E correspondem às estruturas R, Y e P e as falhas sinistrais N35-40W e N-S às estruturas R' e X.

- As juntas com maior frequência na área de estudo apresentam direção N-S, e E-W e N35-40W. Estas últimas destacam-se por apresentarem maiores aberturas (centimétricas), logo os cruzamentos de zonas e conjuntos de juntas que envolvem esta direção podem fornecer quantidades razoáveis de água na região.

- Os eixos de máximos de zonas de juntas com direções principais N65-70E, N45-50E e N35-40W são as mais importantes linhas de fraquezas antigas que foram reativadas durante esforços distensivos e que controlam tectonicamente a distribuição superficial das zonas de juntas na área de estudo.

- Os principais trapas de água subterrânea correspondem aos baixos e altos estruturais com eixos que apresentam direções N65-70E e N45-50E. Destacando-se os baixos para exploração de água subterrânea e os altos para preservação dos aquíferos.

Pela integração dos resultados, as áreas com maior favorabilidade para prospecção de água subterrânea ocupam as áreas com altitude entre 900 e 1100m em unidades do Grupo Andrelândia (P<sub>εaa</sub>) e Complexo Amparo (P<sub>εng</sub>), estando localizadas em Lambari e a nordeste desta região; a noroeste de Soledade de Minas e a sudoeste de São Lourenço. Secundariamente, aparecem outras áreas com maior extensão ocupando estreitos vales entre altitudes de 1000 e 1400m, constituídas por unidades do Complexo Amparo (P<sub>εng</sub>) e Complexo Guaxupé (Agg), as quais ocupam principalmente a região situada a norte e oeste de Cristina e oeste de Lambari.

- Em relação às estâncias hidrominerais de Lambari, São Lourenço e Cambuquira concluiu-se que:

a) Lambari apresenta boas condições por estar em área de baixo estrutural, baixas altitudes (900 a 1100), interseção de falhas N70E com N35-40W e área de moderada a alta frequência de zonas de juntas. O principal controle dos aquíferos é exercido pela direção N70E. As principais área de recarga destes aquíferos situa-se a sul-sudoeste de Lambari.

b) As condições favoráveis de São Lourenço deve-se a interseção de falhas N35-40W com N45-50E, área de baixo estrutural e baixas altitudes (800 a 900m). O principal controle dos aquíferos é exercido pela direção N45-50E. A principal área de recarga destes aquíferos situa-se a sudeste dessa região em unidades Complexo Guaxupé (Agg).

c) Em Cambuquira a favorabilidade deve-se ao fato de estar em área de moderada a alta frequência de zonas de juntas, transição alto-baixo estrutural, baixa altitudes (900-1100m). Possivelmente, o principal controle dos aquíferos é influenciado pelos planos de falhas inversas/de empurrões com caimentos para N e NW. Sua principal área de recarga situa-se nas proximidades ao norte de Cambuquira.

Embora tenha sido elaborada uma tabela para classificação de áreas favoráveis a exploração de água subterrânea, torna-se necessário obter um maior número de dados de poços tubulares para a comparar os resultados obtidos, bem como para definir os pontos de prospecção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, F.F. M.; Hasui, Y.; Neves, B.B. The upper precambrian of South America. In: Bol. Inst. Geoc., USP, 7:45-80, 1976.
- Almeida, F.F.M. Regimes tectônicos Arqueanos na evolução Proterozóica e mineralizações do leste brasileiro. Anais Acad. Bras. Ciênc., 50 (4): 601-602, 1978.
- Anjos, C.E Tectônica da borda da Bacia do Paraná e de seu embasamento na região de Itajubá-Lajes-Santa Catarina: uma abordagem com imagens fotográficas do sistema Landsa-5 e mosaicos de radar. Tese de Doutorado. São Paulo, USP, 1986. 160p.
- Andrade Jr., J.F. Captação das Fontes de São Lourenço. In: Boletim DNPM, 4, Rio de Janeiro, 1942, 40p.
- Artur, A.C. Evolução policíclica da infra-estrutura da porção sul do estado de Minas Gerais e regiões adjacentes ao estado de São Paulo. Tese de Doutorado. São Paulo, USP, 1988. 231p.
- Artur, A. C.; Wernick, E. Terrenos policíclicos estágios de evolução crustal. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 38, Rio de Janeiro, 1984. Anais. Rio de Janeiro, SBG, 1984, v.7, p.3081-3090.
- Badgley, P.C. Structural and tectonics principles. New York, Harper and Row, 1965. 511p.
- Campos Neto, M.C.; Perrota, M.M.; Pelogia, A.V.G.; Figueiredo, M.C.H. A porção ocidental da Faixa Alto Rio Grande (SP-MG). In: Cong. Bras. Geol., 36, Natal, 1990. Anais. Natal, SBG, 1990, v.6, p.2615-2630.
- Cavalcante, J.C.; Cunha, H.C.S.; Chierigati, L.A.; Kaefer, L.Q.; Rocha, J.M.; Daitx, E.C.; Coutinho, M.G.N.; Yamamoto, K.; Drumond, J.B.V.; Rosa, D.B.; Ramalho, R. Projeto Sapucaí, Estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais. Relatório final de geologia. Brasília, São Paulo, DNPM, CPRM, 1979, (Série Geologia, 4; Seção Geológica, 2):229p.
- Companhia de Saneamento Básico do Estado de Minas Gerais (COPASA) Catálogo atualizado de poços. Belo Horizonte, 1990. 350p.
- Crepani, E. Análise de fraturas através de imagens fotográficas de Baixa Resolução espacial: uma contribuição ao estudo da tectônica da região da Chapada do Araripe-NE do Brasil. Tese de Doutorado. USP, São Paulo, 1987. 139p.

- Davino, A. O baixo gravimétrico da região de Caldas Novas, Goiás. Simpósio Regional Geologia, 2., São Paulo, 1979. Atas. São Paulo, SBG, 1979. p.87-100.
- Ebert, H. A tectônica do sul do Estado de Minas Gerais e regiões adjacentes. In: Relatório anual do Diretor da Div. Geol. Min. Rio de Janeiro, 1956, p.97-107.
- Ebert, H. Baustil und regionalmetamorphose in Prakambriischen Grundbirge Brasilies. Tschermaks Mineral. Petrogr. Mitt., 8:49-81, 1962.
- Ebert, H. Beitrag zur giederung des Präkambriums in Minas Gerais. Geol. Rundsch., 45 (3): 471-521, 1971.
- Ebert, H.D.; Hasui, Y.; Sartorato, G.; Almeida, S.H.; Costa, J.B.S. Arcabouço estrutural e tectônica transpressiva das faixas móveis das bordas sul e sudeste do Craton do São Francisco e a Síntaxe de Guaxupé. In: Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, 6., bol. 12. Anais. Belo Horizonte, SBG, 1993, p.166-171.
- Ebert, H.D.; Artur, A.C.; Babinsk, M.; Van Shumus, W.R. Regimes tectônicos e idades U/PB em zircão do Complexo Socorro no Contexto da Faixa Ribeira: um exemplo de magmatismo transpressivo. In: Cong. Bras. Geol., 38., Balneário Camboriú, 1994. Anais, SBG, 1994, v. 1, p.260-261.
- Guy, M. Quelques principes quelques experiences sur la methodologie de la photo-interpretation. In: Simposium International de Photointerpretation , 2., Paris, 1966. Acte. Paris, 1966. v.1.
- Harding, T.P. Petroleum trapps associated with wrench faults. Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., 58:1290-1304, 1974.
- Hasui, Y.; Almeida, F.F.; Brito Neves, B.B. As estruturas brasilianas. In: Congr. Bras. Geo., 30., Recife, 1978, Anais. Recife, SBG, 1978. v.6, p. 2423-2437.
- Hasui, Y. The Mantiqueira Province: Archean structure and Proterozoic evolution. In: Rev. Bras. Geoc., 12: 167-172, 1982.
- Hasui, Y. Aspectos geológicos essenciais da secção Caconde-Caraguatatuba e suas implicações na reconstituição da organização e evolução do Pré-Cambriano do leste paulista. 1º Jornada sobre a Carta Geológica do Estado de São Paulo em 1:50.000 Atas: 227-252, 1983.

- Hasui, Y., Oliveira, M.A.F. Província Mantiqueira, setor central . In: Almeida, F.F.M. e Hasui, Y. coord. O Pré-cambriano do Brasil. São Paulo, Blucher, 1984, p.308-344.
- Hasui, Y.; Costa, J.B.S. Curso de zonas e cinturão de cisalhamento. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 35 , Belém, 1988. Anais. Belém, SBG, 1988, 83p.
- Heilbron, M. O limite entre as faixas de dobramentos Alto Rio Grande e Ribeira na seção geotransversal Bom jardim de Minas (MG)/Barra do Pirai (RJ). In: Congr. Bras. Geol., 36., Natal, 1990. Anais. Natal, SBG, 1990.v.6, p.2813-2826.
- Hobbs, H. Lineaments of the Atlantic border regions. Geological Society of America Bulletin, 15:303-306, 1904.
- Hobbs, B. E. et al. An outline of structural geology. New York, John Wiley, 1976. 525 p.
- Hodgson, R. A. Classification of estruturas on joint surfaces. Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bulletin, 45: 439-459, 1961
- Instituto de Geociências Aplicadas (IGA) Atlas geoeconômico da microregião do Circuito das Águas. Belo Horizonte, IBGE, 1982, 79p.
- Larsson, I., Groundwater in Precambrian rocks in Southern Sweden. In: International Symposium on Ground Water Problems, Stockolm, 1968. Proceedings. Oxford, Pergamon, 1968. p. 23-41.
- Loczy, L.; Ladeira, E. Geologia estrutural: introdução à geotectônica. São Paulo, Edgard Blucher, 1980. 528p.
- Machado, R.; Endo, I. Cinturão de Cisalhamento Atlântico: um exemplo de tectônica Transpressional Neoproterozóica. In: Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, 6., bol. 12, Belo Horizonte, 1993. Anais. Belo Horizonte, SBG, 1993. p.189-191.
- Machado, R.; Endo, I. Superposição cinemática Brasileira no Cinturão de Cisalhamento Atlântico e na Cunha de Guaxupé. In: Cong. Bras. Geol., 38., Balneário Camboriú, 1994. Anais. Balneário Camboriú, SBG, 1994. p.269-270.
- Mourão, B.M. Medicina hidrológica: moderna terapia das águas minerais e estâncias de cura. Poços de Caldas, Prima, 1992, 732p.
- O'Leary, D.W.; Friedman, J.D.; Pohn, H.A. Lineament, linear, lineation: some proposed new standards for old terms. Geological Society of America Bulletin, 87 (10): 1463-1469, Oct., 1976.

- Plicka, M. Observations on joint zones in Moravia Czechoslovakia. In: International Conference on the Embasament Tectonics, 1., Salt Lake City, June 3-7, 1974. Proceedings. Salt Lake City, Utah Geological Association, 1974.
- Pollard D.D.; Aydin A. Progress in understanding jointing over the past century. In: Geological society of America Bulletin, 100:1181-1204, Aug. 1988.
- Price, N.J.; Cosgrove, J.W. Analysis of geological structures. Cambridge University Press, 1990, 494p.
- Projeto RADAMBRASIL. Folha Sf.23/24 Rio de Janeiro/Vitória: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro, DNPM/Projeto RADAMBRASIL, 1983, 775p. (Levantamento de Recursos Minerais).
- Ramsay J.G.; Huber M.I. The techniques of moder structural geology: folds and fractures. Academic Press, London, 1987, 700p.
- Ribeiro, A.; Paciulo, F. V. P.; Andreis, R.R.; Trouw, R.A.J.; Heilbron, M. Evolução policíclica Proterozóica no sul do Cráton do São Francisco: análise da região de São João Del Rei e Andrelândia, MG. In: Congr. Bras. Geol., 36, Natal, 1990. Anais. Natal, SBG, 1990.v.6, p.2605-2614.
- Riedel, W. Zur mechanik geologischer bucherscheinungen. Zentral Blatt F. Mineral. Und. Pal., 1929, B. p.354-368.
- Rivereau, J.C. Notas de aula do curso de fotointerpretação. In: Sociedade de Intercâmbio Cultural e Estudos Geológicos. XI Semana de Estudos, Ouro Preto, 1972.
- Rocio, M.A. R. Caracterização da rede aquífera da região de Caçapava-Paraibuna com o emprego de técnicas de sensoriamento remoto. Dissertação de Mestrado, INPE, São José dos Campos, SP, 1993, 75p.
- Sadowiski, G.R. Sobre a geologia de cinturões de cisalhamento continentais. Tese de Livre Docência. São Paulo, USP, 1983. 108p.
- Slater, P. N. Remote sensing optics and optical systems. Massachussetts, Addison-Wesley Publishing Company. , 1980. 575 p.
- Soares, P.C.; Fiori, A. P. Lógica e sistemática na análise e interretação de fotografias aéreas em geologia. Notícia Geomorfológica, 16 (32): 107-121, 1976.

- Soares, P.C.; Fiori, A. P.; Carvalho, S.G. Tectônica colisional oblíqua entre o Bloco do Paraná e a margem sul do Craton do São Francisco, no Maciço de Guaxupé. In: Cong. Bras. Geol., 36, Natal, 1990. Anais. Natal, SBG, 1990, v.6, p.2723-2734.
- Tchalenko, J.S. Similarities between shear zones of different magnitudes. Geological Society of America Bulletin 81 (6): 1625-1640, 1970.
- Trouw, R. A. J. ; Pankhrust, R. J. Idades radiométricas ao Sul do Craton de São Francisco: região da folha Barbacena, Minas Gerais. In: Simpósio do Craton do São Francisco, 2., Salvador, 1993. Anais. Salvador, SBG, , 1993, p.260-263.
- Veneziani , P.; Anjos, C.E. Metodologia de interpretação de dados em sensoriamento remoto e aplicações em geologia. São José dos campos, INPE, 1982, 61p.
- Veneziani , P. Análise de movimentos da tectônica rúptil-dúctil através da interpretação de produtos se sensores remotos na região do Espinhaço Meridional (MG). Tese de Doutorado. São Paulo, USP, 1987. 186p.
- Veneziani , P.; Anjos, C.E.; Rocio, M.A.; Nascimento, F.M.F.; Bignelli, P.A.; Dias R.R.; Reconhecimento de figuras de interferência geradas pela superposição de dobras flexurais na região do Vale do Paraíba do Sul (SP) com a utilização de sensoriamento remoto. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 7., Curitiba, 1993. Anais. Curitiba, INPE, 1993. p.368-375.
- Wernick E. Contribuição à geologia da borda sul do Craton do São Francisco e suas faixas marginais. Salvador, 1981, Anais. Salvador, SBG, 1981. p.169-179.
- Wilcox, R. E. ; Harding, T. P.; Seeley, D.R. Basic wrench tectonics. In: Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol., 57: 74-96, 1973.