

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
- RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO

ANÁLISE ESTRUTURAL E HIDROGEOLÓGICA
DO AQUÍFERO FRATURADO DA FORMAÇÃO SERRA GERAL
REGIÃO NOROESTE DO RIO GRANDE DO SUL

Autor: GILBERTO MOBUS
Orientador: MARIO L.D.WREGE

Porto Alegre, setembro/87

ANÁLISE ESTRUTURAL E HIDROGEOLÓGICA
DO AQUÍFERO FRATURADO DA FORMAÇÃO SERRA GERAL
REGIÃO NOROESTE DO RIO GRANDE DO SUL

Trabalho apresentado como requisito
para a obtenção do grau de Mestre
em Recursos Hídricos e Saneamento,
área de Águas Subterrâneas, Univer-
sidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, setembro/87

ii

DFCS

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

AGRADECIMENTOS

- Em especial, ao professor Mário Wrege, tanto pela orientação e dedicação conferida, como pela amizade e estímulo oferecidos durante toda a etapa de pós-graduação.
- Ao professor Nelson Luna Caicedo, pelo interesse demonstrado e contribuição técnica-científica.
- Aos colegas de curso, a quem gosto de chamar de amigos, pelos momentos vividos no transcorrer do curso de mestrado.
- Às bibliotecárias do IPH, pelo atendimento atencioso dispensado.
- A Lygia, ao Sérgio e ao Dagoberto, pela confecção final desse trabalho.
- À Superintendência de Desenvolvimento Científico do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação e Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro.
- À Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN) e à Secretaria de Desenvolvimento e Obras Públicas (SDO) pela cedência dos dados, sem os quais não seria possível esta pesquisa.
- Ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas, por ter possibilitado mais esta fase de crescimento.

S U M Á R I O

RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xi

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1. GENERALIDADES	2
1.2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA	3
1.3. OBJETIVOS	6
1.4. SINOPSE METODOLÓGICA	6

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. GENERALIDADES	10
2.2. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA	10
2.2.1. Estratigrafia	13
2.2.2. Geomorfologia	13
2.2.3. Aspectos Estruturais e Tectônicos	14
2.3. CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA	18
2.3.1. Caracterização do Meio Fraturado	20
2.3.2. Comportamento Hidráulico	21
2.3.3. Comportamento Hidroquímico	23
2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	25

CAPÍTULO 3 - TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS ESTRUTURAIS

3.1. GENERALIDADES	27
3.2. PROCEDIMENTOS PRELIMINARES	28

3.3. ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS DADOS ESTRUTURAIS	30
3.3.1. Procedimentos Adotados	30
3.3.2. Superfície de Tendência	32
3.3.3. Tendência da Distribuição Espacial das Fraturas	35
3.4. ANÁLISE DAS ORIENTAÇÕES DAS FRATURAS	41
3.4.1. Procedimentos Adotados	41
3.4.2. Descrição das Técnicas Estatísticas Aplicadas	42
3.4.3. Análise da Tendência das Orientações das Fraturas	44
3.5. ANÁLISE DAS FREQUÊNCIAS DAS ORIENTAÇÕES	54
3.6. RELAÇÃO ENTRE A DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL E A ORIENTAÇÃO DOS DADOS ESTRUTURAIS	57

CAPÍTULO 4 - TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS PARÂMETROS DO AQUÍFERO

4.1. GENERALIDADES	60
4.2. DADOS	61
4.3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	62
4.3.1. Análise de Agrupamento	62
4.3.2. Análise Fatorial	64
4.4. PROCEDIMENTOS	67
4.5. ANÁLISE DE AGRUPAMENTO	68
4.6. ANÁLISE FATORIAL	68
4.6.1. Grupo I	72
4.6.2. Grupo II	76
4.6.3. Grupo III	80
4.6.4. Grupo IV	84
4.6.5. Grupo V	86

CAPÍTULO 5 - INTEGRAÇÃO DOS RESULTADOS

5.1. GENERALIDADES	93
5.2. ÁREAS OCUPADAS PELO GRUPO I	93

5.3. ÁREAS OCUPADAS PELO GRUPO II	95
5.4. ÁREAS OCUPADAS PELO GRUPO III	98
5.5. ÁREAS OCUPADAS PELO GRUPO IV	100
5.6. ÁREAS OCUPADAS PELO GRUPO V	102

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES	107
BIBLIOGRAFIA	113

ANEXO A

DADOS DOS POÇOS LOCADOS NA REGIÃO DA PESQUISA	121
---	-----

RESUMO

Nesta pesquisa foi desenvolvida uma análise da geologia estrutural e das condições hidrogeológicas da região noroeste do estado do Rio Grande do Sul com o objetivo de caracterizar a região quanto a hidrogeologia.

Para a interpretação dos dados disponíveis foram empregadas técnicas geomatemáticas. Pela análise de superfície de tendência tratou-se os dados de distribuição espacial e orientações das fraturas. Os dados hidrogeológicos foram analisados através de métodos matemático-estatísticos de multivariáveis: análise de agrupamento e análise de fatores.

Verificou-se ser possível o estudo do padrão de ocorrência das fraturas, assim como compartimentar a região em áreas de mesmo comportamento em relação as águas subterrâneas, identificando os parâmetros que mais influenciaram na formação dessas áreas.

ABSTRACT

This study analyzed the structural geology and hydrogeological conditions in the Northwest region of the state of Rio Grande do Sul to establish the regional hydrogeology.

Geomathematical techniques were utilized to interpret the available data. Data concerning spatial distribution and direction of the fractures were treated by trend surface analysis. The hydrogeological data were analyzed by mathematical-statistical multivariate methods : cluster analysis and factor analysis.

It was found possible to study fracture occurrence patterns, and also to compartmentalize the region into areas of similar ground water behavior, identifying the parameters which exerted the greatest influence in the formation of these areas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1.	Mapa de localização de área	4
Figura 2.1.	Perfil ideal de um derrame basáltico	11
Figura 2.2.	Mapa geológico-estrutural da bacia do Paraná	17
Figura 2.3.	Domínio das leis e regimes de escoamento ..	22
Figura 3.1.	Mapa morfo-estrutural da área	29
Figura 3.2.	Mapas de tendência de 1º e 2º grau e os respectivos mapas de resíduos de densidade de fraturamento	38
Figura 3.3.	Mapa de tendência de 3º grau e de resíduos da densidade de fraturamento	40
Figura 3.4.	Direção dos azimutes médios das lineações dos três tratamentos realizados	45
Figura 3.5.	Mapas de tendência de 1º e 3º grau e os respectivos mapas de resíduos dos azimutes das lineações no tratamento I	49
Figura 3.6.	Mapas de tendência de 1º e 3º grau e os respectivos mapas de resíduos dos azimutes das lineações no tratamento II	50
Figura 3.7.	Mapas de tendência de 1º e 3º grau e os respectivos mapas de resíduos dos azimutes das lineações no tratamento III	52
Figura 3.8.	Diagrama de setores (e frequência) das direções das lineações	55

Figura 4.1.	Dendrograma de amostras com dados hidrogeológicos	69
Figura 4.2.	Mapa esquemático da distribuição espacial dos grupos hierárquicos	71
Figura 4.3.	Gráficos dos fatores principais da análise fatorial do grupo I	75
Figura 4.4.	Gráficos dos fatores principais da análise fatorial do grupo II	79
Figura 4.5.	Gráficos dos fatores principais da análise fatorial do grupo III	83
Figura 4.6.	Gráficos dos fatores principais da análise fatorial do grupo IV	87
Figura 4.7.	Gráficos dos fatores principais da análise fatorial do grupo V	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1.	Características Físico-Químicas da Unidade Aqüífera Serra Geral no R.G.S. (ABREU,1981)	24
Tabela 3.1.	Parâmetros estatísticos de densidade de fraturamento da área	36
Tabela 3.2.	Parâmetros estatísticos dos azimutes das lineações para os três tratamentos efetuados na análise de tendência vetorial	46
Tabela 4.1.	Valores característicos das variáveis empregadas nas análises multivariantes, discretizadas nos grupos identificados pela análise de agrupamento e no total das amostras	70
Tabela 4.2.	Matriz de correlação, estatística da matriz de correlação e estatísticas das matrizes fatoriais não rotada e rotada do grupo I	73
Tabela 4.3.	Matriz de correlação, estatísticas da matriz de correlação e estatísticas das matrizes dos fatores não rotada e rotada do grupo II	77
Tabela 4.4.	Matriz de correlação, estatísticas da matriz de correlação e estatísticas das matrizes dos fatores não rotada e rotada do grupo III	81
Tabela 4.5.	Matriz de correlação, estatísticas da matriz de correlação e estatísticas das matrizes dos fatores não rotada e rotada do grupo IV	85

Tabela 4.6.	Matriz de correlação, estatísticas da matriz de correlação e estatísticas das matrizes dos fatores não rotada e rotada do grupo V	89
Tabela 5.1.	Características físico-químicas das águas subterrâneas no grupo I	95
Tabela 5.2.	Características físico-químicas das águas subterrâneas no grupo II	97
Tabela 5.3.	Características físico-químicas das águas subterrâneas no grupo III	100
Tabela 5.4.	Características físico-químicas das águas subterrâneas no grupo IV	102
Tabela 5.5.	Características físico-químicas das águas subterrâneas no grupo V	105
Tabela A.1.	Dados dos poços locados na região da pesquisa	121

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. GENERALIDADES

Nos tempos modernos, devido à grande expansão demográfica e às múltiplas aplicações a que a água se destina, há a necessidade de exploração de fontes outras que as superficiais e mesmo as subterrâneas tradicionais (aquíferos granulares). Por isto, os aquíferos fraturados são hoje intensamente estudados e explorados.

A importância de desenvolver metodologia própria para qualificar e quantificar os aquíferos fraturados advém do fato que as ocorrências de rochas fraturadas perfazem aproximadamente 25% da área da superfície dos continentes, sendo que em alguns países, dentre eles o Brasil, tais meios constituem mais de 50% da superfície total, fração esta bastante significativa para ser menosprezada como aquífero. No Rio Grande do Sul, aproximadamente 70% da superfície é constituida por rochas fraturadas ígneas e metamórficas.

A caracterização hidrogeológica de um meio fraturado, incluindo aquíferos cársticos, encontra mais obstáculos que no caso dos aquíferos porosos a interstício, principalmente no que diz respeito ao volume elementar representativo e à mecânica dos meios contínuos, base fundamental da teoria clássica da hidromecânica dos meios porosos.

O comportamento das águas subterrâneas nos meios fraturados está basicamente condicionada à natureza, à geometria e à distribuição das fraturas que dividem o meio rochoso. Alguns trabalhos já demonstraram que, através do processamento estatístico de dados e informações geológicas, es

1.1. GENERALIDADES

Nos tempos modernos, devido à grande expansão demográfica e às múltiplas aplicações a que a água se destina, há a necessidade de exploração de fontes outras que as superficiais e mesmo as subterrâneas tradicionais (aqüíferos granulares). Por isto, os aqüíferos fraturados são hoje intensamente estudados e explorados.

A importância de desenvolver metodologia própria para qualificar e quantificar os aqüíferos fraturados advém do fato que as ocorrências de rochas fraturadas perfazem aproximadamente 25% da área da superfície dos continentes, sendo que em alguns países, dentre eles o Brasil, tais meios constituem mais de 50% da superfície total, fração esta bastante significativa para ser menosprezada como aqüífero. No Rio Grande do Sul, aproximadamente 70% da superfície é constituída por rochas fraturadas ígneas e metamórficas.

A caracterização hidrogeológica de um meio fraturado, incluindo aqüíferos cársticos, encontra mais obstáculos que no caso dos aqüíferos porosos a interstício, principalmente no que diz respeito ao volume elementar representativo e à mecânica dos meios contínuos, base fundamental da teoria clássica da hidromecânica dos meios porosos.

O comportamento das águas subterrâneas nos meios fraturados está basicamente condicionada à natureza, à geometria e à distribuição das fraturas que dividem o meio rochoso. Alguns trabalhos já demonstraram que, através do processamento estatístico de dados e informações geológicas, es

truturais e hidrogeológicas, é possível caracterizar o comportamento das águas subterrâneas em um meio fraturado.

A pesquisa faz um estudo estatístico, procurando estabelecer pontos de apoio para a análise dos aspectos estruturais e hidrogeológicos de um aquífero fraturado. A área escolhida para o estudo é constituída pelas rochas efusivas continentais mesozóicas da Formação Serra Geral.

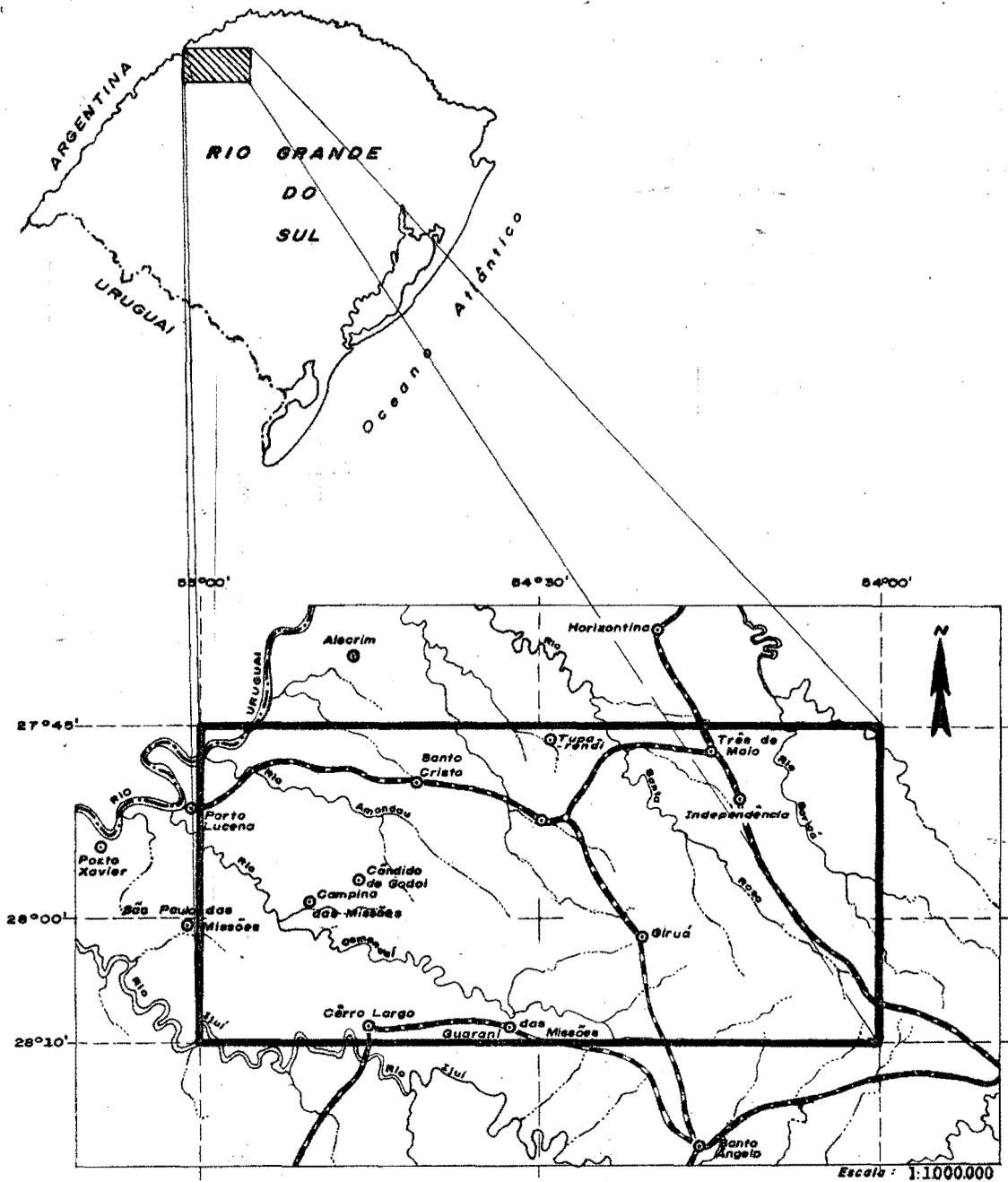
1.2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

A área estudada situa-se a noroeste do estado do Rio Grande do Sul, entre os paralelos $27^{\circ}45'$ e $28^{\circ}10'$ de latitude sul e os meridianos $55^{\circ}00'$ e $54^{\circ}00'$ de longitude oeste. Cobre parcialmente as folhas de Santo Cristo, Santa Rosa, São Luiz Gonzaga e Santo Ângelo (escala 1:100.000), perfazendo aproximadamente uma superfície de 4.500 Km^2 (Figura 1.1).

A escolha da área foi determinada a partir de três critérios básicos:

- devido a espessura da capa de rochas efusivas, ou seja, onde a espessura é tal que inviabilize economicamente a exploração da Formação Botucatu subjacente;
- continuidade de ocorrência do material que compõe o aquífero fraturado;
- disponibilidade de número razoável de poços que a testem o aquífero fraturado, isto é, que haja disponibilidade de dados hidrogeológicos suficientes para o grau de detalhamento que o estudo requer.

Economicamente a região destaca-se com importante parcela da produção agrícola do Estado, destacando-se as culturas de alfafa, trigo e soja. A densidade populacional



LEGENDA

- | | | | | | |
|---|---|----------------------|---|---|----------|
| ○ | — | Cidade | — | — | Estradas |
| — | — | Limite Internacional | — | — | Rios |
| ▨ | — | Área de Estudo | — | — | |

FIGURA 1.1 — MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA .

da região é de aproximadamente 45 habitantes/Km² (IBGE, 1980), sendo uma das maiores concentrações populacionais do Estado. Isto é devido, em grande parte, ao grande potencial agrícola do solo da região.

A temperatura média anual dessa região é de aproximadamente 17°C, mas apresenta extremos bastante acentuados. As chuvas são abundantes e regularmente distribuídas, não se observando um período de estiagem pronunciado. As precipitações médias anuais giram em torno de 1500 a 2500 mm. O solo da região apresenta de 0 a 50 mm de deficiência de umidade.

Os principais rios da região são: Uruguai, Ijuí, Comandã, Amandau, Santo Cristo, Santa Rosa e Buricã. Invariavelmente, o escoamento se dá em sentido ao rio Uruguai. Apesar dos recursos superficiais existentes serem abundantes, o aproveitamento destes é dificultado pois os rios encontram-se encaixados, ou ainda pela dificuldade da localização de sítios para a construção de barragens.

Sob o ponto de vista topográfico, a região de estudo encontra-se inserida em duas regiões fisiográficas características (Ministério da Agricultura, 1973):

- região das Missões: o relevo é suavemente ondulado, caracteriza a porção sul da área da pesquisa;
- região do Alto Uruguai: seu relevo é fortemente ondulado e montanhoso, de cotas entre 200 e 500 metros. Característico da porção norte da área.

Litologicamente, a área apresenta-se totalmente coberta pelas efusivas da Formação Serra Geral. Os aluviões quase inexistem e o elúvio, em geral, não é muito espesso. Morfológicamente, constitui-se em uma unidade tipo planalto e, em termos de hidrogeologia, pertence a província hidrogeológica Planalto Basáltico (HAUSMAN, 1962).

1.3. OBJETIVOS

O objetivo principal da pesquisa foi a análise das feições estruturais superficiais e dos parâmetros hidrogeológicos existentes do aquífero fraturado da unidade aquífera Serra Geral, visando salientar a relação desses elementos com a distribuição das águas subterrâneas na região em questão. Procurou-se também verificar a existência de um zoneamento hidrogeológico na região, analisando em detalhe os parâmetros que mais condicionaram tais zonas.

Espera-se que as informações obtidas e as técnicas aplicadas no presente estudo possam fornecer subsídios à pesquisa hidrogeológica, com a perspectiva que a metodologia aqui empregada possa ser aprimorada e aplicada a outras áreas de ocorrência de aquíferos fraturados. Espera-se também que os resultados aqui obtidos colaborem na maximização dos resultados positivos na prospecção hidrogeológica da Formação Serra Geral na área em questão.

1.4. SINOPSE METODOLÓGICA

A abordagem metodológica processou-se em três etapas básicas. A primeira etapa constituiu-se numa revisão bibliográfica sobre a Formação Serra Geral. Na segunda etapa efetuou-se a análise dos dados estruturais e hidrogeológicos da região por meio de técnicas geomatemáticas. Por fim, na terceira etapa, realizou-se a síntese dos resultados obtidos.

Na revisão bibliográfica procurou-se caracterizar a Formação Serra Geral sob o ponto de vista geológico e hidrogeológico. Na parte de geologia enfocaram-se os aspectos litológicos, genéticos, estratigráficos, geomorfológicos e deu-se ênfase à estrutural e à tectônica. Na parte de hidro

geologia procurou-se caracterizar o meio fraturado e dar noções sobre o comportamento hidráulico e hidroquímico de um meio poroso por fratura. Esta primeira etapa visou a caracterização da formação geológica e do aquífero fraturado constituído pelas rochas efusivas mesozóicas da bacia do Paraná, como também mostrar alguns dos aspectos principais a serem enfocados e algumas das limitações encontradas quando da análise de um aquífero fraturado.

As técnicas geomatemáticas empregadas para o tratamento dos dados estruturais e hidrogeológicos consistiram - se nas análises estatísticas tridimensionais de tendência e nas análises multivariantes de agrupamento hierárquico e fatorial. Pela análise de superfície de tendência foram tratados dados da distribuição espacial e da orientação das fraturas. Este procedimento objetivou a delimitação de zonas com semelhantes padrões estruturais e com características próprias sob o ponto de vista tectônico. Pelas análises multivariantes de agrupamento e de fatores foram tratados os dados dimensionais, hidrodinâmicos e hidrofisicoquímicos, selecionados e observados em poços da região. Por meio destas análises visou-se conhecer a influência simultânea dos parâmetros selecionados em diversos locais da região, delimitando zonas onde estes parâmetros tivessem a mesma variabilidade e definindo as interrelações entre eles dentro de cada grupo.

Na última etapa procedeu-se a integração dos resultados obtidos das análises, estrutural e hidrogeológica, pelas técnicas geomatemáticas. Primeiramente fez-se a sobreposição dos mapas das superfícies de tendência dos dados estruturais analisados sobre as áreas de ocorrência dos grupos detectados pela análise de agrupamento. Com base nisso, descreveu-se as áreas nos seus aspectos estruturais e hidrogeológicos, procurando assim obter uma interpretação hidrogeológica do conjunto de todas as informações. Dados adicio

nais sobre a química das águas subterrâneas locais foram aí adicionados.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. GENERALIDADES

A seqüência vulcânica que compõe a Formação Serra Geral é parte integrante das unidades Gonduânicas que constituem a bacia do Paraná.

A bacia do Paraná se caracteriza por ser uma grande bacia intracratônica, simétrica, que engloba toda a área drenada pelos rios Paraná e Uruguai. O tectonismo nesta bacia é pouco expressivo, sendo as deformações estruturais existentes atribuídas ou a movimentos verticais de grande amplitude ou a falhas de gravidade localizadas, ou ainda podem ser atribuídas a reativação das linhas de fraqueza do embasamento.

A bacia do Paraná individualiza-se como unidade autônoma de sedimentação a partir do Devoniano. No final do Jurássico e início do Cretáceo ocorreram atividades diastróficas, de natureza tensional e ligadas a separação continental, que possibilitaram o extravazamento de enormes quantidades de lavas. Este processo durou dezenas de milhões de anos, dando origem ao que hoje conhecemos por Formação Serra Geral.

2.2. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA

A Formação Serra Geral foi descrita primeiramente por DERBY, em 1878, que denominou de "Paraná Trap" as rochas efusivas originadas por vulcanismo tipo fissural na bacia do Paraná. Em 1908, WHITE propôs e introduziu esta se-

quência como unidade estratigráfica.

Os derrames deram-se sobre planos praticamente horizontais; afirmação esta com base na atual posição das ângatas horizontais nas vesículas dos derrames (LEINZ, 1949), o que mostra também que os movimentos posteriores não provocaram inclinações sensíveis. A espessura de cada derrame é variável, sendo a espessura total média para toda a bacia do Paraná estimada em 650 metros (LEINZ, 1966). O número de derrames é variável.

LEINZ (1949) descreve um perfil clássico de uma corrida de lavas (Figura 2.1): na parte basal do derrame ocorre alguns metros de vidro e rocha vulcânica negra, passando gradualmente para um termo microcristalino rico em disjunção horizontal. Acima, tem-se uma zona onde predominam as disjunções verticais e depois, novamente uma zona de basalto com disjunção horizontal. No topo ocorre uma zona de basalto vesicular e/ou amigdalóide.

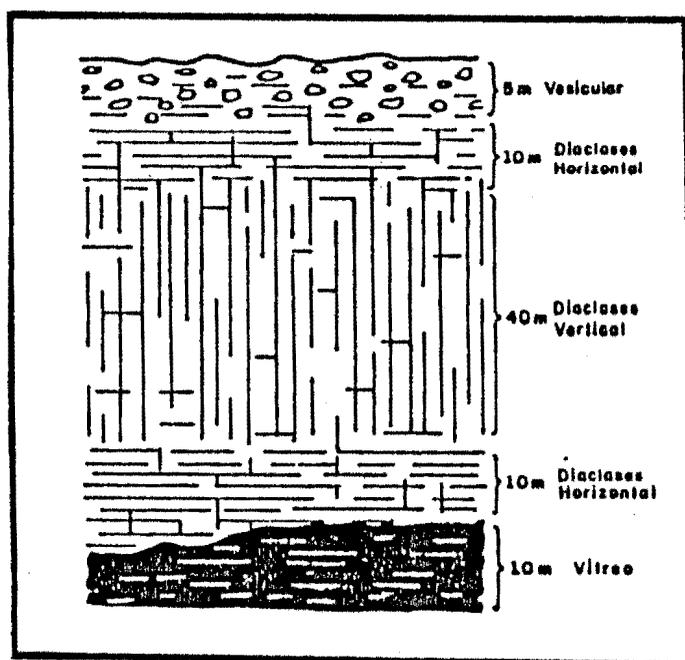


FIGURA 2.1 — PERFIL IDEAL DE UM DERRAME BASÁLTICO
(FONTE: LEINZ, 1949).

Petrograficamente, a Formação Serra Geral apresenta uma completa suite de tipos litológicos, que vão desde os termos básicos até os termos ácidos. O vulcanismo basáltico é o mais extenso e é constituído predominantemente por basaltos toleíticos e andesito-basalto (BELLIENI et al., 1984). Os derrames de composição intermediária apresentam uma ampla distribuição na bacia. Constituem-se desde quartzo-andesitos até quartzo-traquíitos, predominando os latitos. As vulcânicas ácidas são as menos expressivas, variando em composição de dacitos a riolitos, predominando os riodacitos.

Petrogeneticamente, várias são as opiniões: SCINEIDER (1964) postula pelos processos de diferenciação magmática; HALPERN et al. (1974) acreditam na assimilação, em larga escala, da crosta sílica; RUEGG apud SCHOBENHAUS et al. (1984) acentua a influência das heterogeneidades do manto na geração de líquidos magmáticos diversificados. CORDANI et al. apud SCHOBENHAUS et al. (1984) propõe uma origem por fusão crustal para os termos ácidos, o que é apoiado por ROINSEMBERG (1978). BELLIENI (1984) sugere uma gênese por diferentes materiais do manto.

SZUBERT et al. (1979) apresentam um esquema de evolução para as rochas mesozóicas continentais da bacia do Paraná. A evolução vulcânica inicia-se com um estágio fissural e finaliza com acumulações alongadas do tipo escudo ou dômico. Os derrames basálticos correspondem ao estágio inicial de fissura ao estágio de vulcanismo de escudo, e as rochas ricas em sílica caracterizariam o estágio dômico final.

1. SCHOBENHAUS, C. et al. 1984. Geologia do Brasil, texto explicativo do mapa geológico do Brasil e da área oceânica adjacente, incluindo depósitos minerais, escala 1:2500000. Brasília, DNPM. p.347.

2. Ibid. p.348.

2.2.1. Estratigrafia

A Formação Serra Geral assenta-se sob a Formação Botucatu de forma discordante, do tipo litológico e erosivo. Lentes intertrapianas de arenito são frequentemente observadas nos primeiros espasmos basálticos, como na porção sudoeste do Rio Grande do Sul. Sobre os derrames ocorre uma cobertura descontínua de sedimentos, que recebe regionalmente a denominação de Formação Tupaciretã, cuja ocorrência é restrita à porção centro-leste do planalto. Na área da presente pesquisa tais sedimentos não se encontram mapeados, assim como não foram observadas lentes de arenito intertrapia no nos perfis dos poços da região.

A Formação Serra Geral, cronologicamente, pode ser delimitada entre o Triássico Superior e o Cretáceo Superior. Datações radiométricas situam a atividade vulcânica no intervalo de 118 à 150 milhões de anos atrás (MELFI, 1967).

2.2.2. Geomorfologia

Segundo CARRARO et al. (1974), a seqüência das efusivas da bacia do Paraná pertence à província geomorfológica denominada de Derrames Basálticos. HAUSMAN (1966) divide os aspectos morfológicos dessa província em três formas bem definidas. São elas: Planalto, Borda de Planalto e Cuesta. A área em pesquisa encontra-se totalmente inserida na unidade morfológica tipo planalto.

O planalto forma uma porção elevada, plana, com escarpas estruturais e erosionais individualizando-a em relação as outras unidades. O rebaixamento da superfície original é devido à processos tanto erosionais como tectônicos. Na região das Missões a superfície apresenta-se suavemente inclinada para oeste e entalhada pela drenagem, formando va

les acentuados cujas orientações são impostas pela tectônica. HAUSMAN (1962) salienta que os patamares, presentes na maioria dos vales formando patamares estruturais, são originados principalmente pela alternância entre as juntas horizontais e verticais típicas em derrames.

A área de pesquisa mostra um relevo fortemente acidentado à oeste, gradando para uma feição de platô elevado com dissecamento primário à leste.

2.2.3. Aspectos Estruturais e Tectônicos

O padrão estrutural da Formação Serra Geral é o reflexo do já existente no Mesozóico inferior, pois os eventos tectônicos que afetaram a crosta após a extrusão das lavas mesozóicas foram de natureza epirogenética, ascensionais ou de acomodação, com base nas antigas linhas de fraqueza (falhas). Por isso, para melhor compreensão da geologia estrutural da área em estudo, faz-se necessário um breve apanhado das principais estruturas resultantes dos eventos tectônicos pré-Serra Geral que afetaram o embasamento cristalino e o pacote sedimentar Gonduânico da bacia do Paraná.

a. Escudo Sul-Riograndense

O escudo Sul-Riograndense, parte integrante do escudo Atlântico-Sul, constitui-se no embasamento cristalino da bacia do Paraná no Rio Grande do Sul. É formado por duas unidades geotectônicas básicas: o craton Rio de la Plata à oeste, e o cinturão D.Feliciano à leste. Ambas unidades são de idade Arqueana, de evolução complexa e afetadas por diversos ciclos tecto-orogênicos, sendo o último o ciclo Brasileiro, entre 680 à 1000 milhões de anos atrás (ISSLER, 1974).

PICADA (1972) caracterizou quatro sistemas principais de falhas que exerceram importante papel na formação,

disposição espacial e preservação das unidades geotectônicas do escudo Sul-Riograndense. São eles:

- sistema de falhas Dorsal de Canguçu (N 35-75 E), de direção principal N 40 E;
- sistema de falhas Passo do Marinheiro (N 5 W a N 15 E), de direção principal N-S;
- sistema de falhas açotéia-Piquiri (N 30 E);
- sistema de falhas Noroeste (N 65-75 W).

Segundo o mesmo autor, são dominantes as direções nordeste-sudoeste, de natureza transcurrente, formadas a partir de uma tectônica de quebramento.

JACKSON (1973) caracterizou os sistemas de falhamentos N 20-30 E e N 50-60 W, sendo estas direções coincidentes com o sistema regmático mundial, de idade Arqueana-Proterozóica. Tanto no sistema nordeste, de caráter regional, como no sistema noroeste, de menor amplitude, predominaram os movimentos verticais.

b. Pacote Sedimentar Gonduânico da Bacia do Paraná

O tectônismo da bacia do Paraná pré-efusivas é de caráter Germanótipo inicial (movimentos epirogenéticos verticais tipo blocos falhados), com predominância de falhas tensionais (OPPENHEIN, 1961). Segundo LOCZY (1976), muitos dos processos tectônicos que afetaram o pacote sedimentar Gonduânico apresentaram estreita relação com a extrusão vulcânica durante a reativação tecto-magmática, denominada Wealdeniana por ALMEIDA (1967) e red denominada como evento Sul-Atlântico por SCHOBENHAUS et al. (1984), que culminou com a separação do continente americano do continente africano. Segundo o autor, a pressão da lava mobilizada foi a causadora da reativação do fraturamento tensional e, numa segunda fase de falhamento, o movimento epirogenético do

embasamento abriria passagem para o magma ascendente.

O pacote sedimentar Gonduânico sofreu também basculamentos após a extrusão das lavas da Formação Serra Geral, devido ao reequilíbrio isostático ocorrido pelo acréscimo de material vulcânico na superfície terrestre (LOCZY, 1968). O sistema de falhamento da zona sedimentar da bacia do Paraná apresenta como direções principais NNE-SSW e, secundariamente, NW-SE.

c. Efusivas Mesozóicas da Bacia do Paraná

Segundo NORTHFLEET et al. (1969), a principal direção dos alinhamentos da bacia do Paraná é paralela ao eixo de direção NW-SE do arco de Ponta Grossa. Os mesmos autores citam ainda uma segunda direção preferencial, NNE-SSW, considerada secundária. Tais alinhamentos são bem evidenciados no mapa geológico-estrutural da bacia do Paraná por FULFARO (1982) Figura 2.2. Ambas as direções constituíram o caminho preferencial das efusivas no Mesozóico. Uma das principais zonas produtoras (geolases) foi o lineamento Torres-Posadas, com reflexos visíveis na área da presente pesquisa e que, segundo LEINZ (1949), pode ter servido como "dobradiça" dos movimentos tectônicos ou isostáticos durante ou após o vulcanismo, inclinando o pacote sedimentar Gonduânico no sentido convergente a este eixo tectônico, fazendo com que aí encontrem-se as maiores espessuras dos derrames.

As falhas tensionais, de direção NNE-SSW e NW-SE, pré Serra Geral, sofreram reativações após os derrames principais terem ocorrido, formando as estruturas em mosaico detectadas no interior da bacia do Paraná em levantamentos estruturais regionais (LOCZY, 1976). Novos basculamentos ocorreram em períodos mais recentes, o que é atestado pela lenta subsidência moderna do rio Paraná.

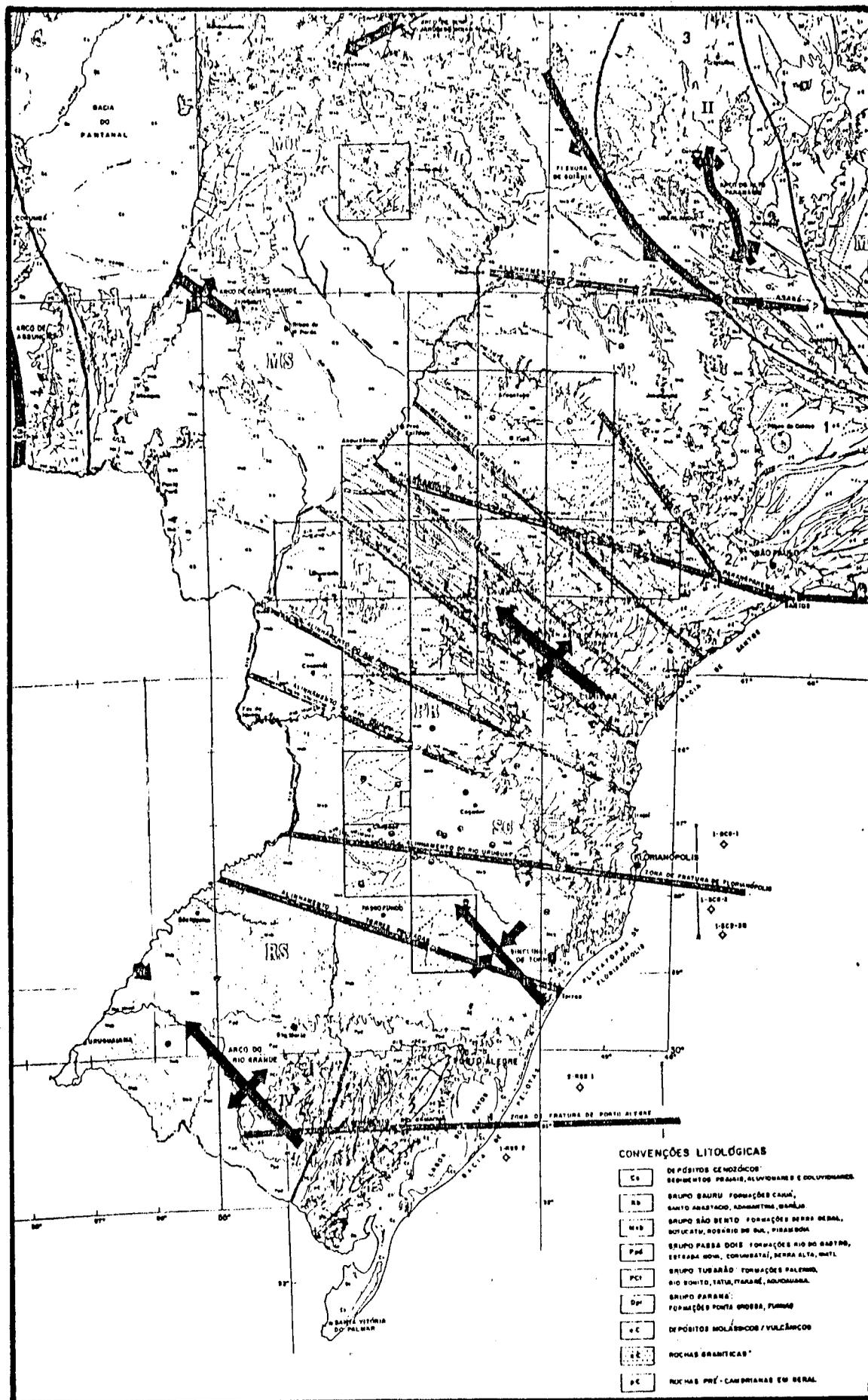


FIGURA 2.2 - MAPA GEOLÓGICO ESTRUTURA DA BACIA DO PARANÁ (FONTE: FULFARO ET AL, 1982).

Mais recentemente, SOARES et al. (1981 a,b,c) em estudos morfoestruturais realizados em imagens LANDSAT e radar da bacia do Paraná, detectaram e definiram seis direções preferenciais das estruturas que mostram uma nítida compartimentação regional. Segundo os autores, os lineamentos mais frequentes nas efusivas Serra Geral são:

N 45 ⁺ 5 W - direção Médio Ivaí	(30%)
N 25 ⁺ 5 W - direção Goioxim	(19%)
N 65 ⁺ 5 W - direção Médio Piquiri	(18%)
N 35 ⁺ 5 E - direção Médio Paraná	(18%)
N 5 ⁺ 5 W - direção Tapiracui	(8%)
N 60 ⁺ 5 E - direção Pitanga	(6%)

Os mesmos autores detectaram diversas feições estruturais interpretadas como estruturas dômicas. As estruturas dômicas, quando apresentam determinadas relações geométricas com os falhamentos, podem estar relacionadas geneticamente com estes, contudo, deve-se ressaltar que tais estruturas podem refletir somente traços de acamamento dos derrames.

2.3. CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA

A seqüência de rochas efusivas da Formação Serra Geral constitui o aquífero de mesmo nome. Segundo BISCALDI (1968), o fato mais importante que caracteriza o comportamento hidrogeológico das rochas efusivas é o de que tais rochas apresentam uma porosidade original (primária) negligenciável⁽¹⁾. Salienta, no entanto, que as rochas efusivas apresentam uma porosidade por fissura, também primária, gerada quando do resfriamento das lavas. Em suma, as caracterís

(1) excessão feita aos materiais provenientes de projeções vulcânicas e nas eventuais zonas vesiculares interconectadas.

ticas hidrogeológicas primárias (porosidade e permeabilidade) das efusivas são baixas, no conjunto, e localizadas. Este quadro tende a ser modificado no decorrer do tempo geológico pela ação dos agentes de intemperismo e dos esforços tectônicos atuantes na massa rochosa, gerando uma porosidade e permeabilidade secundária.

As rochas efusivas tendem a se alterar, principalmente na porção superficial, devido ao desequilíbrio entre as condições ambientais e as condições onde estas rochas foram geradas. O manto de alteração caracteriza-se principalmente por apresentar uma elevada porosidade, mas péssimas condições de transmissividade dessa água armazenada, devido a baixíssima condutividade hidráulica própria das argilas. Segundo WREGG et al. (1978), a camada de alteração funciona como um aquífero em relação a rocha sã subjacente pois, mesmo que lentamente, transmite a água que armazenou, e o faz de maneira contínua no tempo e sobre toda a área de ocorrência.

A fraturação dos maciços rochosos oferece às águas subterrâneas os caminhos de percolação. LOUIS (1974) afirma que mesmo as fissuras mais finas conferem ao maciço condutividades hidráulicas elevadas comparativamente à sua matriz rochosa. Há duas maneiras pelas quais as fraturas e fissuras que fragmentam as rochas efusivas podem se formar. A primeira, de natureza adiastrófica, é gerada quando do resfriamento do material ígneo e sua conseqüente contração e ruptura. A outra maneira é pela ação dos esforços tectônicos atuantes após a consolidação do corpo rochoso. São estas últimas que assumem maior importância na circulação das águas nas rochas efusivas, pois provocam a integração de toda a coluna rochosa, gerando excelentes zonas para a infiltração e circulação d'água, apesar de que tais fraturas podem se encontrar fechadas devido a intrusão de materiais ígneos, injeções hidrotermais, preenchimento por argilas, ou mesmo devido a natureza do movimento que gerou o fraturamento.

2.3.1. Caracterização do Meio Fraturado

O meio poroso em estudo, constituído pelas rochas e fusivas da Formação Serra Geral, caracteriza-se por ser um meio poroso por fratura (excluído o manto de alteração). Um aquífero fraturado tende a se constituir em um meio anisotrópico, heterogêneo e descontínuo, à escala de obras de captação.

A descontinuidade do meio está implícita no próprio conceito de fratura pois, fraturas "são descontinuidades físicas existentes na rocha e que se caracterizam por terem um comportamento planar e uma ocorrência geográfica restrita" (WREGE et al., 1978). O critério de continuidade é estatístico, devendo ser avaliado com base no volume elementar representativo, ou seja, pode-se considerar um sistema de fraturas como contínuo sempre que a densidade e a extensão das fraturas forem grandes, isto é, quando a dimensão do bloco elementar é negligenciável perante a dimensão do fenómeno considerado (fluxo).

Dado que a abertura e a frequência das fraturas podem variar com a orientação das mesmas, o meio fraturado comporta-se como anisotrópico. Normalmente os três eixos do elipsóide de permeabilidade serão diferentes (CUSTÓDIO, 1976).

A heterogeneidade é dada pelo fato que a fratura possui características pontuais, ou seja, o valor encontrado em um local para um determinado parâmetro poderá não ser o mesmo mais adiante, ainda que medido na mesma fratura ou no mesmo sistema de fraturas, lateral ou verticalmente.

Vê-se, pois, que a caracterização de um meio fraturado apresenta uma certa complexidade. Ressalte-se que a identificação dos parâmetros neste meio, sejam dimensionais,

hidráulicos ou químicos, está condicionada ao volume do meio utilizado como referência.

2.3.2. Comportamento Hidráulico

Em face aos aspectos distintos dos aquíferos fraturados e granulares, o comportamento das águas subterrâneas no meio poroso por fratura requer uma abordagem específica para que possa ser tratado dentro das leis da hidráulica clássica dos meios porosos, principalmente no que tange o comportamento médio dos poros (fraturas).

As fraturas introduzem um número infinito de variações que determinam condições hidráulicas complexas. A condutividade hidráulica dentro de uma fratura apresenta variações bastante acentuadas, em função da rugosidade e da abertura da fratura, além de depender das condições de fluxo.

Em relação ao movimento da água no meio fraturado, pode-se raciocinar sobre a hipótese de fraturas como planos de paredes com certa rugosidade e com uma largura média característica. LOUIS (1974) classificou os regimes de escoamento em uma fratura em:

- hidráulicamente liso: o escoamento é laminar, e o coeficiente de perda de carga (λ) é função do número de Reynolds (Re)⁽¹⁾;
- intermediário: o escoamento laminar não mais ocorre, e agora a perda de carga é função tanto do número de Reynolds como da rugosidade relativa (C')⁽²⁾.

(1) Número de Reynolds (Re) = $(D_h \cdot V) / \nu$, onde D_h = diâmetro hidráulico, V = velocidade média do fluxo, ν = viscosidade cinemática.

(2) Rugosidade relativa (C') = e / D_h , onde e = rugosidade absoluta (altura da aspereza) e D_h = diâmetro hidráulico.

- hidraulicamente rugoso: o escoamento é turbulento, sendo agora a perda de carga função somente da rugosidade relativa.

Os limites entre os regimes de escoamento (Figura 2.3) expressos pelo número de Reynolds, dependem da rugosidade relativa.

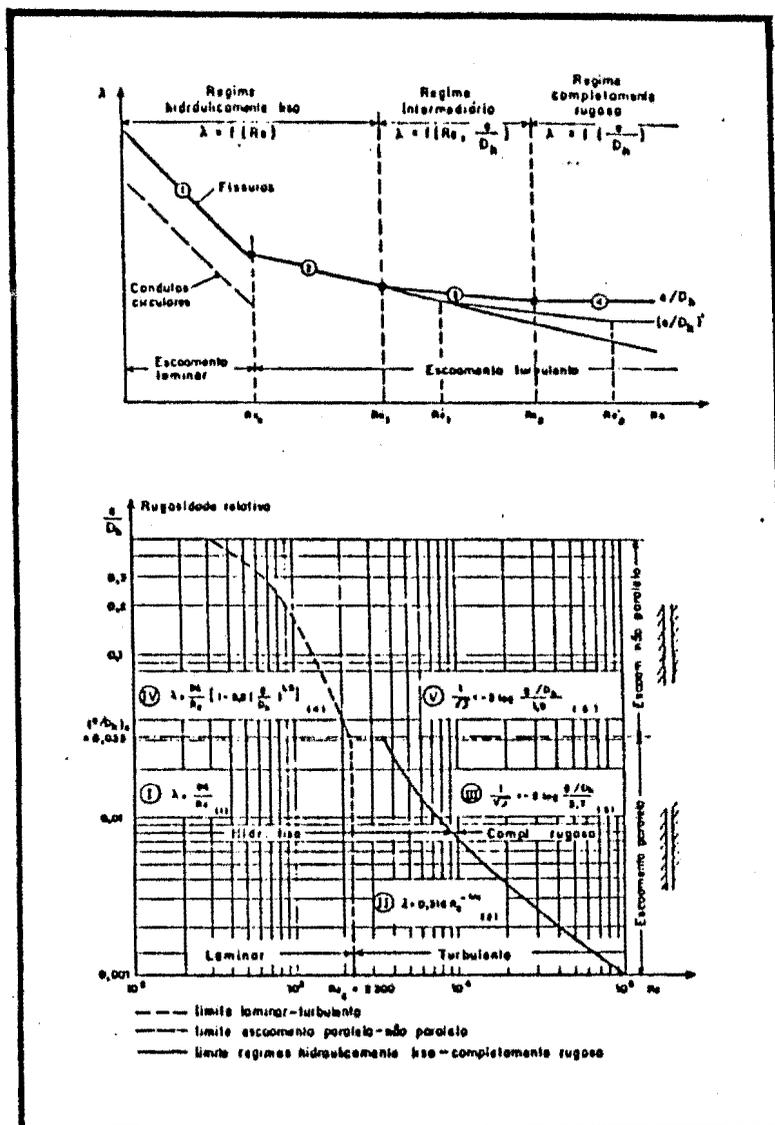


FIGURA 2.3 — DOMÍNIO DAS LEIS E REGIMES DE ESCOAMENTO (FONTE: LOUIS, 1974).

A mecânica do armazenamento de água, assim como da liberação desta, depende das condições hidráulicas do sistema poroso, em função das condições de confinamento ou não da superfície potenciométrica. No tocante a este aspecto pouco pode-se inferir, pois desconhece-se o valor do coeficiente de armazenamento do aquífero fraturado da Formação Serra Geral. Acredita-se que o fato de o nível estático observado nos poços dessa unidade aquífera se encontrarem a níveis bem superiores às entradas de água (fraturas interceptadas) não represente o produto de pressão confinante, mas sim o equilíbrio hidrostático com a mais elevada superfície potenciométrica.

A alimentação das fraturas provém principalmente da filtração vertical da água da chuva infiltrada na camada de alteração. Os exutórios são determinados pela topografia atual ou pela paleotopografia (WREGE, 1979).

2.3.3. Comportamento Hidroquímico

Em um meio poroso por fratura, a difusão dos elementos químicos contidos na água subterrânea não apresenta a mesma geometria que nos meios porosos granulares, dado ao fato dos elementos minerais dissolvidos, em sua maioria na forma iônica, concentrarem-se segundo as direções estruturais preferenciais de fluxo, não havendo pois a continuidade lateral típica dos aquíferos granulares. HAUSMAN (1987), com base no trabalho realizado por MARTINS (1979) no aquífero Serra Geral na região sudoeste do Rio Grande do Sul (subprovíncia geomorfológica da Cuesta), verificou que a mineralização das águas subterrâneas obedece a um controle estrutural bastante claro.

ABREU (1981), no estudo hidroquímico das águas subterrâneas no estado do Rio Grande do Sul, compilou e analisou

sou 224 poços perfurados na unidade aquífera Serra Geral (Tabela 2.1). Verificou que, em escala regional, as águas dessa unidade são de boa qualidade, tanto para o consumo humano como animal ou industrial. Isto se deve, possivelmente, ao fato de que o tempo de permanência do contato da água com a rocha seja curto, pois normalmente a velocidade de circulação das águas em tal meio é rápida (ABREU, 1981), fazendo com que a cedência de sais seja lenta, além de que a área de contato rocha-água é pequena comparativamente aos aquíferos granulares. Segundo o autor supracitado, as anomalias (teores superiores a média) são função da dissolução dos constituintes da rocha (ferromagnesianos, principalmente) e minerais secundários que preenchem as fraturas, fissuras e diaclases mais alteradas.

Tabela 2.1 - Características Físico-Químicas da Unidade Aquífera Serra Geral no R. G.S. (ABREU, 1981)

Características Físico-Químicas	Valor mínimo	Valor médio	Valor máximo
resíduo seco (mg/l)	15.0	191.0	1303.0
alcalinidade (mg/l)	3.0	86.4	390.0
dureza (mg/l)	0.0	55.2	414.0
pH	5.4	7.4	9.9
sílica (mg/l)	0.3	49.5	224.5
cálcio (mg/l)	0.5	16.3	57.4
magnésio (mg/l)	0.06	4.3	55.0
sódio e potássio (mg/l)	0,2	22.6	325,0
bicarbonatos (mg/l)	3.6	102,7	375.0
sulfato (mg/l)	0,2	7.4	118.1
cloreto (mg/l)	0.4	12.7	337.0
fluoreto (mg/l)	0,1	1.3	5.3
ferro (mg/l)	0.02	0.95	22.0
manganês (mg/l)	0.02	-	0.66

2.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os aquíferos fraturados apresentam comportamento distinto dos aquíferos detriticos. As características de a nisotropia, de heterogeneidade e de descontinuidade caracterizam um meio poroso por fratura e, dado os princípios físicos básicos, limitam a aplicação de métodos usuais para qualificar e quantificar tais meios. Qualquer metodologia que explique a parametrização de um aquífero fraturado deve, necessariamente, lançar mão do conceito de volume elementar representativo para a simplificação racional do complexo meio poroso por fratura como intuitivamente Darcy o fez em relação ao meio poroso granular.

Como visto, não basta que a fratura, ou o sistema de fraturas, se apresente aberta, ou seja, em condições teóricas de possuir água, para que a fratura seja produtiva. Muitas vezes geram-se vias preferenciais de ocorrência e circulação de água, fazendo com que o escoamento ocorra somente segundo um sistema de fraturas. Um dos fatores que provavelmente gera tal condicionamento são os esforços tectônicos orientados que atuaram sobre a crosta terrestre.

O estudo da distribuição espacial e das orientações das fraturas, analisando a tendência estrutural e os esforços que geraram tal fraturamento, assim como o estudo das características hidrogeológicas do aquífero através de dados extraídos de poços, podem diminuir o fator de incerteza na localização de jazimentos e na extração de água no aquífero fraturado.

CAPÍTULO 3

TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS ESTRUTURAIS

3.1. GENERALIDADES

Na geologia estrutural, qualquer observação obtida deve ser interpretada como resultante de duas causas (forças) ou conjunto de causas: a que configura o padrão regional e a que causa desvios localizados (anomalias) do padrão regional.

A análise de superfície de tendência é uma das ferramentas da geomatemática mais empregada para o tratamento de dados distribuídos numa área. Por este método procura-se detectar, com base nos dados observados, dois componentes: um de natureza regional e outro de flutuações locais.

Um problema óbvio é como podem os dados ser objetivamente separados em componentes "regional" e "local", uma vez que tais termos são inteiramente subjetivos. Uma definição operacional é dada a estes componentes. Assim sendo, a tendência (componente regional) é definida como uma função linear das coordenadas geográficas de um conjunto de pontos (observações), de tal maneira que o quadrado dos desvios da tendência sejam minimizados (DAVIS, 1973). Os resíduos dessas superfícies de tendência mostram os desvios em relação aos valores observados, detectando-se assim os valores anômalos locais.

Com vista a sistematizar e integrar as informações obtidas da interpretação estrutural em imagens de radar e aerofotos, foram dois os aspectos analisados por superfície de tendência: a distribuição espacial e a orientação das fraturas geológicas. Somando-se a isto, efetuou-se também

uma análise de frequência das fraturas.

3.2. PROCEDIMENTOS PRELIMINARES

Como base para a análise dos dados estruturais foi confeccionado um mapa na escala 1:100.000 (Figura 3.1). Na realização desse mapa foram empregados mosaicos obtidos a partir de imagens de radar (Projeto Radan.Brasil), tendo como material de apoio fotos aéreas pancromáticas, na escala 1:60.000, e imagens de satélite LANDSAT, na escala 1:500.000 e 1:250.000. A interpretação das feições estruturais em imagens de radar foram feitas com o auxílio de uma lupa e, quando do uso de aerofotos, empregou-se estereoscópio de espelho. Os dados assim obtidos foram diretamente graficados em papel "overlay". A este mapa foram adicionadas informações acerca da morfologia da região obtidas a partir de fotomo-saicos, na mesma escala (INCRA, 1965).

Quando do processo de extração das informações estruturais das imagens de radar e aerofotos, fez-se necessário estabelecer conceitos que definissem claramente os elementos a serem obtidos na interpretação fotogeológica.

Basicamente são dois os tipos de discontinuidades passíveis de serem observadas em imagens de radar e aerofotos: as oriundas do empilhamento ou descontiduidades estratiformes singenéticas, e as produzidas por deformações tectônicas ou discontinuidades estruturais. De interesse para a presente pesquisa são as discontinuidades estruturais, ou seja, aquelas que podem constituir reflexo de falhas em profundidade. Assim, coube ao autor estabelecer critérios para distinção destas das discontinuidades controladas pelo acamadamento (traço de acamadamento). Assim, toda feição retilínea ou curva, composta por elementos de drenagem e/ou re-

levo, apresentando comprimento igual ou superior a 1 (um) quilômetro, foi considerada alinhamento e interpretada como lineamento estrutural. Formas anelares e radiais dos elementos da drenagem, ou outras que apresentassem características distintas da disposição geral dos elementos da drenagem, foram consideradas formas anômalas em relação ao padrão geral.

Outro fato que deve se fazer saber é que as imagens de radar, devido ao sistema de imageamento usado por este tipo de sensor-remoto, não registram as feições estruturais que tenham seu alinhamento orientado segundo o sentido Norte-Sul. Feições estruturais com tal orientação somente são registradas em imagens de satélite e fotografias aéreas. Fica aqui registrado que, se poucas ou nenhuma fratura com alinhamento Norte-Sul foi registrada, deve-se aos impecilhos acima citados, não pelo fato de não existirem.

3.3. ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS DADOS ESTRUTURAIS

Para a análise da distribuição espacial das fraturas foi empregado o tratamento estatístico tridimensional conhecido por análise de superfície de tendência. O parâmetro utilizado foi o da densidade de ocorrência, ou seja: a relação entre o comprimento das fraturas e a área de sua ocorrência.

3.3.1. Procedimentos Adotados

Sobre o mapa estrutural, na escala 1:100.000, esta beleceu-se uma malha, com cinco linhas no sentido dos paralelos e dez linhas segundo os meridianos, ficando assim a área subdividida em cinquenta quadrículas de igual área.

Cada quadrícula tem uma área de aproximadamente noventa quilômetros quadrados.

Em cada quadrícula foram medidos os comprimentos de todas as fraturas nela compreendida. Daí, calculou-se o parâmetro densidade de ocorrência, também denominado de densidade de fraturamento, que se constitui em:

$$DF = \frac{\Sigma L}{A} \quad (3.1)$$

onde:

DF = densidade de fraturamento

ΣL = somatório dos comprimentos de todas as fraturas dentro da quadrícula

A = área da quadrícula

Para melhor visualização, os valores das densidades de fraturamento foram uniformizados. Esta uniformização foi obtida através da fórmula:

$$X_p = \frac{X_o - X_{mín.}}{X_{máx.} - X_{mín.}} + 1 \quad (3.2)$$

onde:

X_p = valor da DF uniformizada

X_o = valor da DF observada

$X_{mín.}$ = valor da menor DF

$X_{máx.}$ = valor da maior DF

Desta maneira, o parâmetro densidade de fraturamento apresenta um intervalo de variação de 1 a 2.

Foi realizada a análise de tendência da densidade de fraturamento de todas as fraturas, assim como o levantamento dos valores característicos que envolviam este parâmetro. A seguir é descrito o princípio básico da técnica esta

tística de superfície de tendência.

3.3.2. Superfície de Tendência

Uma equação de regressão é uma expressão empregada para avaliar uma variável dependente "Y" em função das variáveis independentes "X1, X2, ..., Xn". Assim, no caso de três variáveis, a equação de regressão mais simples de "X1" e "X2" para "Y" toma a forma:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 \quad (3.3)$$

onde b_0 , b_1 e b_2 são constantes, denominadas coeficientes de regressão parcial. Uma superfície de tendência linear é uma equação do tipo (3.3), onde "Y" pode ser considerado como uma função linear de algum valor constante " b_0 " relacionado à média das observações, mais um componente " b_1 " que multiplica a variável independente "X1" (coordenada N-S) e outro componente " b_2 " que multiplica a variável "X2" (coordenada W-E).

Através do método dos mínimos quadrados são calculados os coeficientes de regressão parcial que melhor definem uma superfície que se ajuste ao conjunto de pontos observados. Com este procedimento pode-se obter os coeficientes " b_i " para cada superfície de grau "p" desejada, pois a superfície linear dos mínimos quadrados pode ser expandida para uma superfície de grau qualquer⁽¹⁾. Em uma distribuição aleatória, o ajuste melhora a medida que o grau do polinômio aumenta, apesar de que não é recomendado expandir o polinômio além do 6º grau dado ao excessivo aumento das ope

(1) Na natureza, a componente regional de grandes áreas raramente poderá ser descrita por um plano ou superfície de 1º ordem (WERMUND & JENKINS, 1970).

rações matemáticas e, conseqüentemente, aumento do tempo de processamento, além da necessidade de computadores de maior porte (KRUMBEIN, 1959).

De posse dos coeficientes "bi" e das coordenadas "X1" e "X2" de cada ponto, pode-se obter o valor calculado "Yc" de cada variável dependente "Y". Este valor difere do observado "Yo" em uma quantidade "Ri", que é o resíduo. O resíduo tende a ser menor quanto melhor for o ajuste da superfície aos dados observados. Com "Yoi", "Yci" e "Ri" pode-se calcular a variação total tendo-se as médias dos valores observados (" \bar{Y}_o ") e calculados (" \bar{Y}_c "):

$$\sum_{i=1}^n (Yoi - \bar{Y}_o)^2 = \sum_{i=1}^n Ri^2 + \sum_{i=1}^n (Yci - \bar{Y}_c)^2 \quad (3.4)$$

onde o primeiro termo do lado direito ($Ri^2 = (Yci - \bar{Y}_c)^2$) é denominado variação não explicada, enquanto que o segundo termo ($(Yci - \bar{Y}_c)^2$) é a variação explicada, pois tem um padrão definido (SPIEGEL, 1971), e "n" é o número de pontos (observações).

Com base nisto, a qualidade do ajuste de uma superfície de tendência pode ser testada estatisticamente, comparando-se a variação associada à regressão (tendência) e a variação associada aos desvios da regressão. Isto é realizado através de uma análise de variância.

Um modo de avaliar o quanto a variável dependente é explicada pela regressão é através da razão entre a soma da variação explicada e a soma da variação total. Esta razão é denominada coeficiente de determinação (R^2), assim:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{ci} - \bar{Y}_c)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{ci} - \bar{Y}_o)^2} \quad (3.5)$$

de onde se conclui que, quanto maior for " R^2 " melhor será a aderência dos dados à regressão. " R^2 " varia de 0 a 1. O coeficiente de correlação amostral (R) é dado por:

$$R = \pm \sqrt{R^2} \quad (3.6)$$

e varia de -1 a 1. Os sinais + ou - indicam correlação positiva ou negativa, respectivamente. " R " é considerado o melhor indicador em análise envolvendo regressão.

Deve-se ter certos cuidados quando se efetua a análise por superfície de tendência. DAVIS (1973) e LANDIM(1978) alertam que:

- o número de pontos observados deve exceder ao número de coeficientes da equação polinomial a ser calculada ou o resultado obtido não é válido;
- se testes estatísticos forem efetuados, o número de pontos deve ser suficientemente grande, pois eles determinam os graus de liberdade, que por sua vez influem na eficácia da metodologia estatística;
- o número e o espaçamento dos pontos de controle têm influência direta no tamanho dos desvios locais que podem ser detectados na análise;
- as observações devem ser feitas apenas em relação à área coberta pelos pontos, evitando-se considerar pontos de controle além dos limites do mapa.

Para o processamento matemático-estatístico da distribuição espacial das fraturas foi empregado um programa de computador, elaborado por DAVIS (1973) e modificado pelo autor. O programa de análise por superfície de tendência (programa TREND) consiste basicamente de três partes : uma rotina para gerar a matriz da soma das potências e dos produtos cruzados, uma equação que resolva e/ou inverta a matriz e um algoritmo que plote os dados gerados. Foram incluídas sub-rotinas que permitissem a análise estatística das superfícies de tendência.

Como desejava-se detectar também as anomalias (desvios) efetuou-se análises por superfície de tendência de até terceiro grau. Foram confeccionados mapas de resíduos conjuntamente aos mapas de tendência.

3.3.3. Tendência da Distribuição Espacial das Fraturas

Na tabela 3.1 encontram-se as estatísticas da análise de tendência até o 3º grau da densidade de fraturamento da área pesquisada.

No estudo (teste) de uma equação de superfície de tendência, a relação de interesse é aquela entre a variância devida à regressão e a variância devida aos desvios da regressão (variância residual). Na análise de variância aplicou-se o teste de Fisher-Snedecor (teste F) ao quociente da variância explicada pela variância residual, para verificar probabilisticamente se a variância estudada foi obtida por amostragem randômica de uma mesma população (DAVIS, 1973), ou, em termos menos formais, o teste F constitui-se em um teste de hipóteses com alternativas

$$\begin{aligned} H_0: b_1 = b_2 = \dots = b_n = 0 \\ H_1: b_1, b_2, \dots, b_n \neq 0 \end{aligned} \quad (3.7)$$

Tabela 3.1 - Parâmetros estatísticos da densidade de fraturamento da área

D E N S I D A D E D E F R A T U R A M E N T O							
E S T A T Í S T I C A S		S U P E R F Í C I E D E T E N D Ê N C I A					
		1º		2º		3º	
média dos valores observados (\bar{Y}_o)		1.49		1.49		1.49	
desvio padrão dos valores observados		0.20		0.20		0.20	
variança dos valores observados		6.00	0.04	0.04	0.04	0.04	
soma dos quadrados	regressão	2	0.50	5	0.85	9	1.05
	resíduos	$n-3$	1.57	$n-6$	1.23	$n-10$	1.02
	total	$n-1$	2.07	$n-1$	2.07	$n-1$	2.07
varianças	explicada (V_a)	0.25		0.17		0.12	
	residual (V_r)	0.03		0.03		0.03	
coeficiente de determinação (R^2)		0.24		0.41		0.51	
Coeficiente de correlação (R)		0.49		0.64		0.71	

A hipótese a ser testada é a de que os coeficientes de regressão parcial (b_1, b_2, \dots, b_n) são iguais a zero ou, em outras palavras, não há regressão. Os valores obtidos para o quociente F nas três análises (Tab. 3.1) foram sempre superiores aos valores do F tabelado a nível de 5%, o que leva a rejeitar a hipótese testada, e a alternativa H_1 é aceita, mostrando que a distribuição da variável dependente em questão (densidade de fraturamento) depende dos valores das coordenadas geográficas (variáveis independentes).

Com base nos coeficientes de correlação (Tab. 3.1) nota-se que somente a análise de tendência de grau três apresenta uma boa aderência da regressão aos dados observados.

O mapa da superfície de tendência linear (1º grau) mostra que há um aumento da densidade de fraturamento de noroeste para sudeste (Fig. 3.2-a). Em relação à área, isto significa dizer que a densidade das estruturas tende a aumentar de Porto Lucena para Giruá. A média calculada do parâmetro densidade de fraturamento (DF) está contida, aproximadamente, na linha reta que une as sedes municipais de Independência e Guarani das Missões. Como o coeficiente de correlação é baixo ($R=0,49$), a superfície de tendência linear serve somente como visão muito simplificada da tendência da distribuição das feições tectônicas em questão. Isto se reflete claramente no correspondente mapa dos desvios, onde se nota diferenças de até 0,23 entre o valor observado (ou calculado por interpolação) e o gerado pela equação de tendência. Observa-se que os maiores desvios encontram-se nos municípios de Cerro Largo, Campina das Missões, Giruá e Cândido Godói (anomalias positivas) e nas porções do extremo sudoeste e do centro-leste da área (anomalias negativas).

O mapa da superfície de tendência quadrática (2º grau) já permite visualizar um novo padrão de densidade de fraturamento na região (Fig. 3.2-b). Agora as isolinhas de

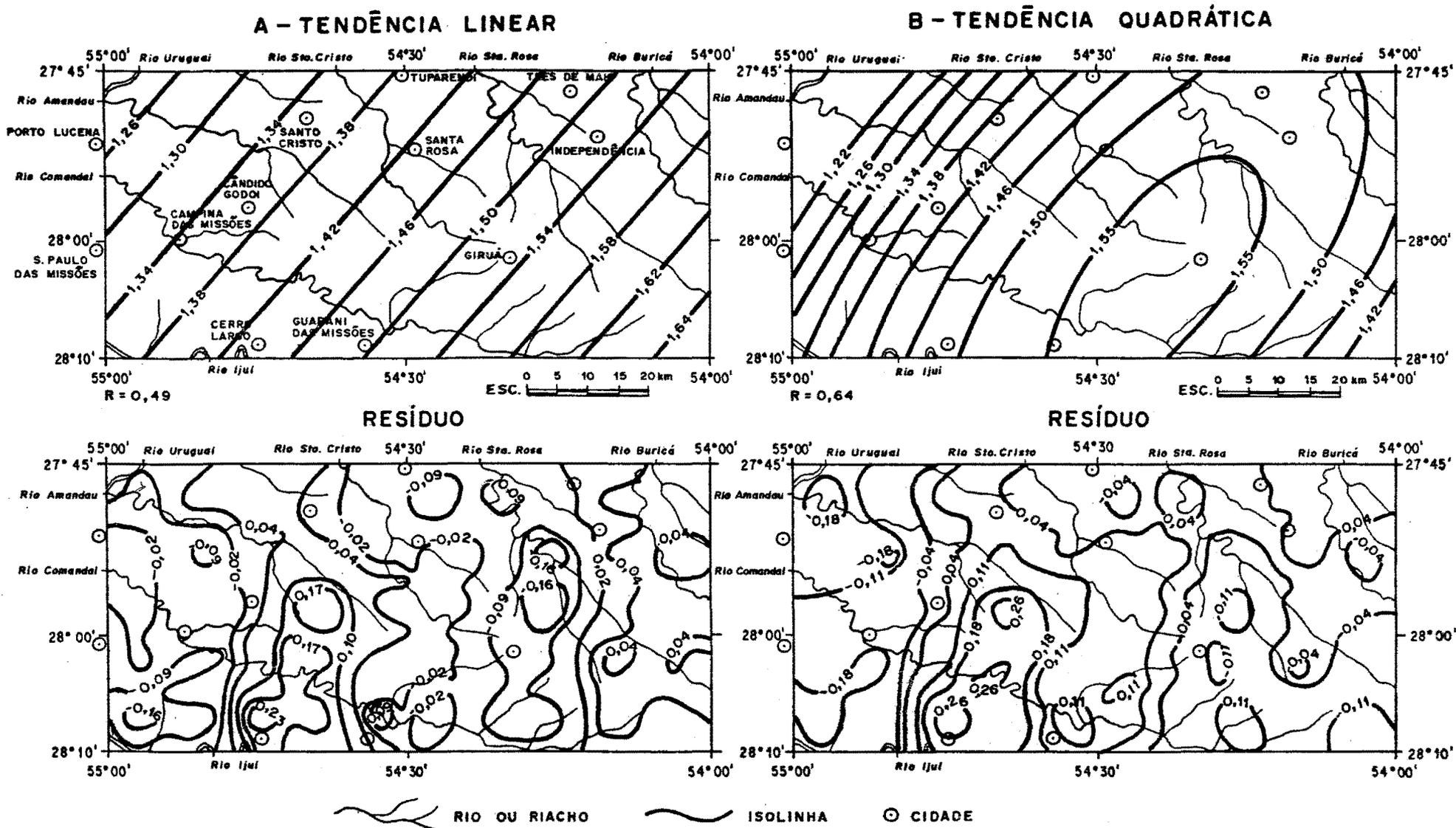


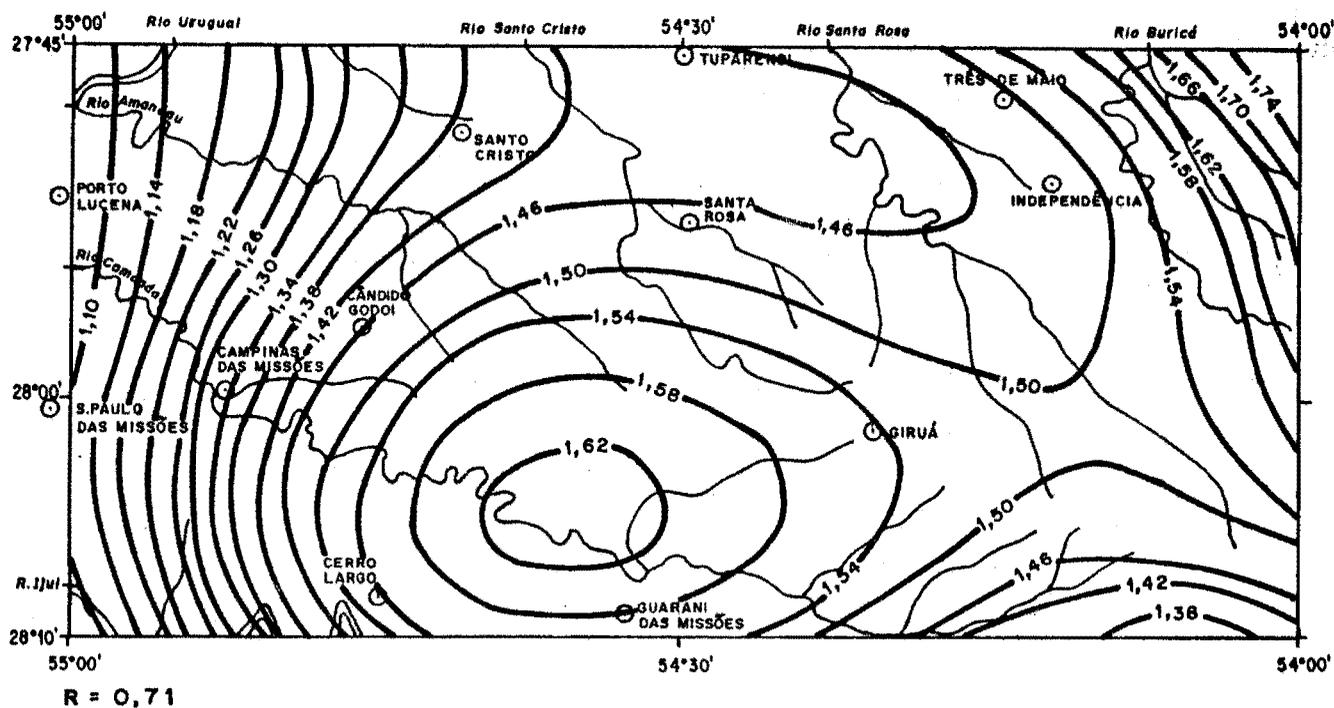
FIGURA 3.2 - MAPAS DE TENDÊNCIA DE 1º E 2º GRAU E OS RESPECTIVOS MAPAS DE RESÍDUOS DA DENSIDADE DE FRATURAMENTO

densidade adquirem um caráter semi-circular, com valores crescentes para o centro, abrangendo áreas parciais dos municípios de Giruá, Independência e Guarani das Missões. O elipsóide formado pelas isolinhas de densidade de maior valor apresenta seu eixo maior paralelo às isolinhas geradas pela superfície de tendência linear. O coeficiente de correlação ($R=0.64$) apresenta um significativo aumento na aderência dos dados gerados aos observados, o que faz com que a amplitude dos valores dos resíduos diminua sensivelmente.

No mapa de tendência cúbica (3° grau) observa-se agora um padrão já mais complexo das isolinhas DF (Fig.3.3). Novamente um sistema circular se faz presente, com seu centro (maior DF) locado aproximadamente entre os municípios de Giruá e Guarani das Missões. Uma tendência crescente da densidade de fraturamento se verifica na porção nordeste da área. A porção oeste da área confirma-se como a região que apresenta a tendência de menor densidade de fraturamento. Observa-se no mapa de resíduos da superfície de tendência cúbica que as áreas que apresentam as maiores anomalias positivas são ainda as áreas de Cerro Largo, Cândido Godói e porções a leste e a oeste dos municípios de Cerro Largo, Campina das Missões, Cândido Godói, Santa Rosa (parte norte), Giruá (parte norte-sul central) e Guarani das Missões são as áreas que apresentam as maiores anomalias negativas.

Em função dos resultados obtidos, verificou-se que a área localizada entre os municípios de Cerro Largo, Cândido Godói e Giruá, área esta que apresentou as maiores anomalias positivas nos três mapas de resíduos, está contida também nas zonas de alta densidade de fraturas das superfícies de tendência de 2° e 3° graus, configurando-se assim como a área com o maior potencial hidrogeológico da região do ponto de vista estrutural (mais densamente fraturada). Também a região nordeste, pela análise da tendência cúbica, caracterizou-se como uma área de fraturamento elevado, apresentando os maiores valores do parâmetro estudado de toda a região.

TENDÊNCIA CÚBICA



RESÍDUO

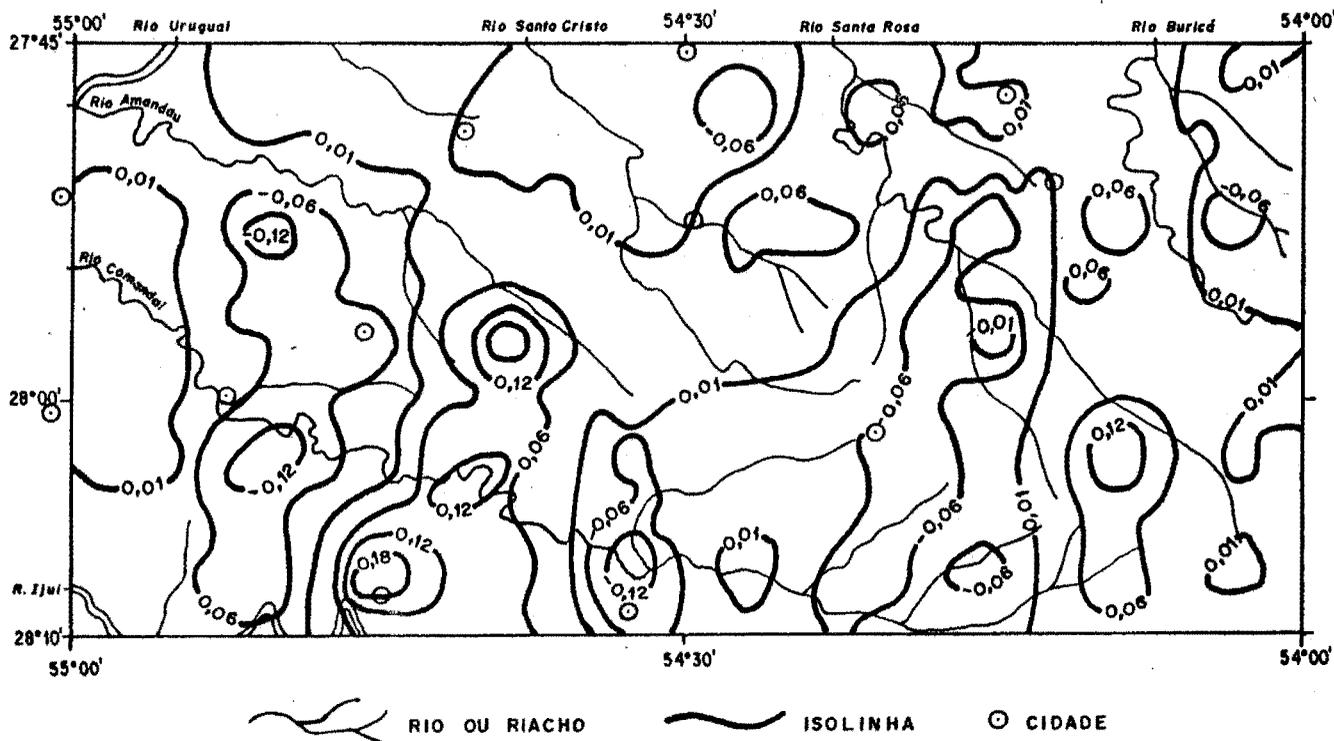


FIGURA 3.3 - MAPAS DE TENDÊNCIA DE 3º GRAU E DE RESÍDUOS DA DENSIDADE DE FRATURAMENTO

De forma análoga, pode-se inferir que a porção oeste da região analisada é a que se apresenta mais fracamente fraturada (menor densidade de fraturamento) a nível regional, caracterizando-se assim como uma possível área de baixo potencial hidrogeológico no tocante ao aquífero fraturado. Esta mesma área caracteriza-se também por apresentar um relevo bastante acidentado e topograficamente menos elevado que a porção leste da área, que se caracteriza morfologicamente como um platô superior com dissecamento primário.

3.4. ANÁLISE DAS ORIENTAÇÕES DAS FRATURAS

Na análise das orientações das fraturas fez-se uso da técnica geomatemática denominada análise de tendência vetorial. Assim, procurou-se visualizar o padrão da tendência regional das orientações das fraturas e as anomalias, deflexões da tendência regional. O parâmetro aqui empregado foi o azimute das fraturas até 180 graus.

3.4.1. Procedimentos Adotados

Como base para a análise das orientações das fraturas foi empregado o mesmo mapa utilizado na análise da distribuição espacial das fraturas (mapa estrutural). A malha já antes estabelecida foi mantida, permanecendo as 50 quadrículas de igual área. Foram medidos 328 azimutes que, discretizados nas 50 celas, deram origem a 606 azimutes. Os ângulos foram medidos a partir do norte do mapa, no sentido dos ponteiros do relógio, num intervalo de variação de 180 graus.

Estatisticamente foram analisadas três situações. Primeiramente submeteu-se à análise de tendência vetorial todos os azimutes medidos. Posteriormente analisou-se, pela

mesma técnica estatística, somente os azimutes contidos no primeiro quadrante (norte-leste) e após, somente os azimutes do segundo quadrante (leste-sul). O intuito da análise em separado dos azimutes nestes dois quadrantes foi o de procurar melhor visualizar os distintos padrões de orientação regional que por ventura exista na área da presente pesquisa.

3.4.2. Descrição das Técnicas Estatísticas Aplicadas

Para a análise da tendência estrutural da área foi empregado o programa de computador para análise de tendência vetorial de dados direcionais elaborado por FOX (1967), modificado e adaptado para microcomputador pelo autor.

O programa inicialmente calcula o azimute médio para cada cela. Este azimute é calculado pelo método vetorial apresentado por STEINMETS (1962) que, baseado em equações formuladas por FISHER (1953), calcula a dispersão de pontos em uma esfera, obtendo-se um vetor resultante "Rv". A magnitude desse vetor resultante permite ter uma idéia do grau de dispersão dos azimutes da cela; "Rv" será igual a "n" (número de observações) quando todos os azimutes (ângulos) medidos no conjunto das observações são iguais. Quanto maior a divergência entre os ângulos, menor será "Rv". Para uma percepção mais acurada foi também calculada a magnitude do vetor resultante em termos de porcentagem, conforme a fórmula abaixo (CURRAY, 1956):

$$L = \frac{Rv}{n} \times 100 \quad (3.8)$$

onde:

L = magnitude do vetor resultante em porcentagem

R_v = magnitude do vetor resultante
 n = número de vetores observados

O azimute médio obtido (direção do vetor resultante R_v) é interpretado como medida da tendência central da distribuição dos azimutes da cela. O princípio de cálculo tem por base a minimização da soma dos desvios e, consequentemente, a maximização dos cossenos dos desvios. O ângulo obtido corresponde, de maneira semelhante, à origem da variância mínima de CHAYES (1954).

O programa calcula também um círculo de confiança, na esfera, ao redor do eixo do vetor resultante, definindo assim desvio sobre a zona do "melhor eixo". O raio esférico do círculo de confiança (θ) assemelha-se ao intervalo de confiança de uma regressão e, como tal, pode ser calculado para níveis de significância de 0.05 e 0.01.

Uma vez calculados os azimutes médios para cada cela, o programa calcula, por álgebra matricial, os coeficientes dos polinômios ortogonais que determinaram as superfícies de tendência (KRUMBEIM et al., apud FOX, 1967). Os valores residuais são calculados para cada superfície de tendência subtraindo-se o valor da tendência em cada cela do correspondente valor do vetor resultante. São ainda calculados os coeficientes de determinação e de correlação para cada superfície gerada.

Por último, o programa elabora os mapas de superfície de tendência de grau desejado, assim como os respectivos mapas de resíduos, onde é possível visualizar os desvios, positivos ou negativos, em relação à tendência calculada.

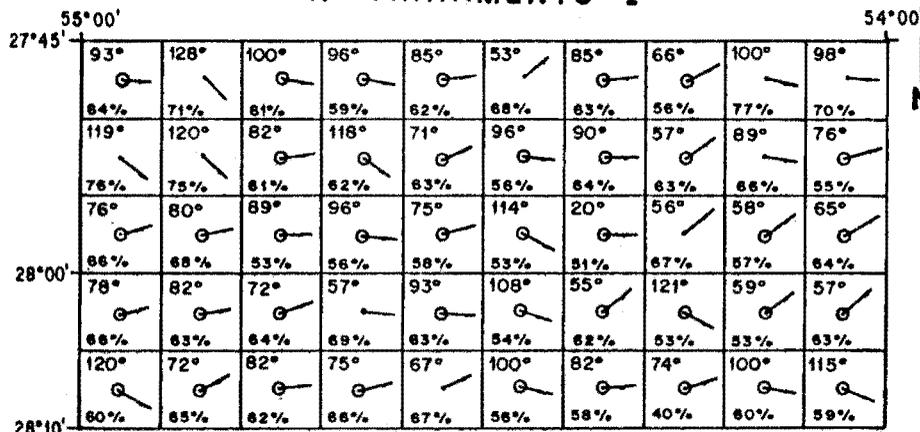
3.4.3. Análise da Tendência das Orientações das Fraturas

Os mapas dos vetores resultantes (Fig. 3.4) para cada um dos três tratamentos realizados (tratamento I - todos os azimutes; tratamento II - somente os azimutes contidos no 1º quadrante; e tratamento III - somente os azimutes contidos no 2º quadrante) mostram graficados em cada quadrícula o ângulo e a magnitude percentual do vetor resultante, assim como o próprio vetor. Nestes mapas também estão assinalados, com um círculo na origem, os vetores resultantes que apresentaram pouca significância estatística, isto é, vetores cujo círculo de confiança (θ) ou magnitude percentual (L) excederam um limite tolerável; no tratamento I os valores limites de θ e L foram 40° e 60% respectivamente, e nos dois outros tratamentos somente foi fixado um valor limite para theta, no caso 20° , uma vez que a magnitude percentual do vetor resultante foi sempre superior a 90%. A tabela 3.2 apresenta os dados estatísticos obtidos pela análise de tendência vetorial para os três tratamentos.

Das três situações estudadas, somente no tratamento I os indicadores de confiabilidade (θ e L) do processo aplicado para o cômputo dos azimutes médios (vetores resultantes) se mostraram "baixos" em termos de aderência. Observa-se (Fig. 3.4-a) que mais de 50% dos vetores resultantes apresentaram fraca aderência aos dados observados, motivo pelo qual resolveu-se analisar as orientações dos azimutes em intervalos angulares menores (tratamento II e tratamento III).

Os vetores resultantes no tratamento II mostraram um intervalo de variação entre 25° e 50° (Fig. 3.4-b), tendo o vetor médio resultante azimute igual a 36° , com magnitude percentual de 99,3% e com raio do círculo de confiança (θ), a nível de 5%, igual a 1,71 (Tabela 3.2), o que mostra uma excelente aderência. Observa-se que, na porção oriental da área

A - TRATAMENTO I

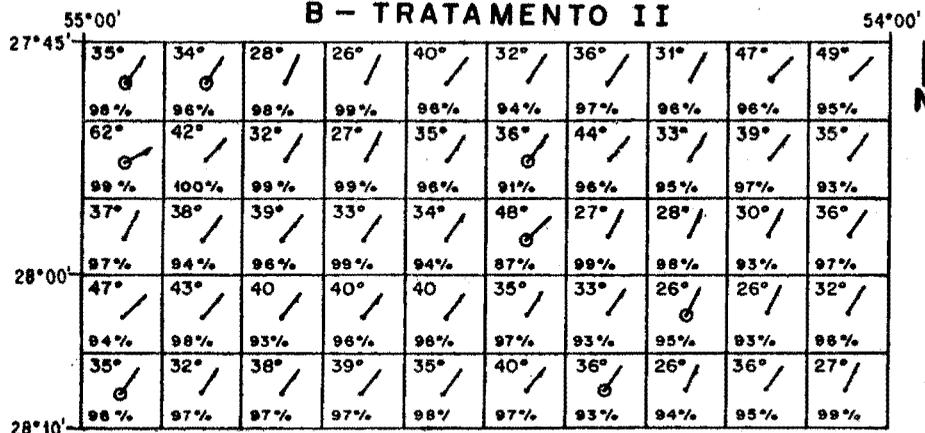


LEGENDA DAS QUADRÍCULAS

AZIMUTE MÉDIO
 VETOR
 MAGNITUDE DO VETOR
 RESULTANTE(%)

O - AZIMUTE MÉDIO COM POUCA SIGNIFICÂNCIA ESTATÍSTICA

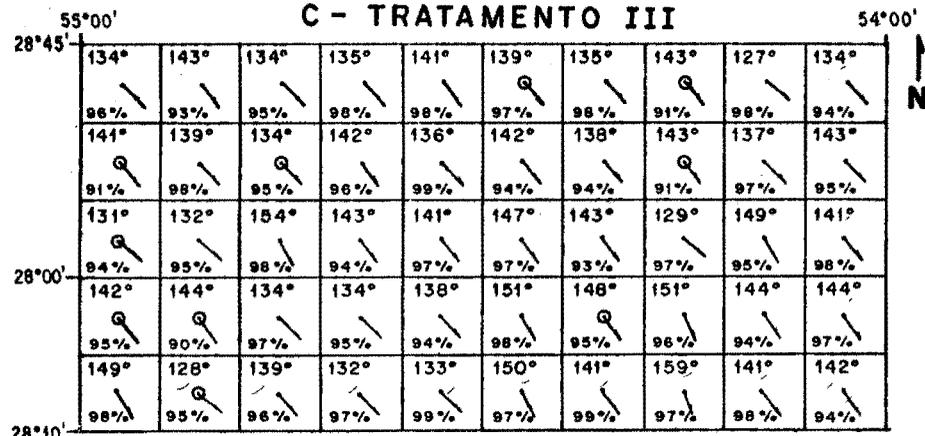
B - TRATAMENTO II



AZIMUTE MÉDIO
 VETOR
 MAGNITUDE DO VETOR
 RESULTANTE(%)

O - AZIMUTE MÉDIO COM POUCA SIGNIFICÂNCIA ESTATÍSTICA

C - TRATAMENTO III



AZIMUTE MÉDIO
 VETOR
 MAGNITUDE DO VETOR
 RESULTANTE(%)

O - AZIMUTE MÉDIO COM POUCA SIGNIFICÂNCIA ESTATÍSTICA

FIGURA 3.4 - DIREÇÕES DOS AZIMUTES MÉDIOS DAS LINEAÇÕES DOS TRÊS TRATAMENTOS REALIZADOS

Tabela 3.2 - Parâmetros estatísticos dos azimutes das lineações para os três tratamentos efetuados na análise de tendência vetorial.

A Z I M U T E S D A S F R A T U R A S										
ESTATÍSTICAS		SUPERFÍCIE DE TENDÊNCIA								
		Tratamento 1			Tratamento 2			Tratamento 3		
		1º	2º	3º	1º	2º	3º	1º	2º	3º
Azimute médio (graus)					----- 36° -----			----- 140° -----		
Magnitude do vetor resultante (%)					----- 99.3 -----			----- 99.3 -----		
Raio do círculo de confiança					----- 1.71 -----			----- 1.80 -----		
Soma dos quadrados	regressão	1539.2	2758.9	3660.7	202.7	537.9	1086.5	286.6	454.2	558.8
	resíduos	18227.7	17007.9	16106.2	2285.9	1960.6	1402.3	1955.7	1788.1	1683.5
	total	19776.9	19776.9	19776.9	2488.6	2488.6	2488.6	2242.3	2242.3	2242.3
Variança	explicada (Va)	769.6 *	551.8 *	406.7 *	101.3 *	105.6 *	120.7	143.3	90.8 *	62.1 *
	residual (Vr)	387.8	386.5	402.6	48.6	44.6	35.1	41.6	40.6	42.1
Coeficiente de determinação (R ²)		0.08	0.14	0.18	0.08	0.21	0.44	0.13	0.20	0.25
Coeficiente de correlação (R)		0.28	0.37	0.43	0.28	0.46	0.66	0.36	0.45	0.50

* apresentaram valores de $F_c < F_t$, à nível de 5%

rea, ocorre um aparente aumento do azimute dos vetores resultantes à nordeste.

No tratamento III (Fig. 3.4-c), os azimutes dos vetores resultantes variam de 126° a 159° , apresentando como azimute médio 140° , com 99,32% de magnitude percentual (Tabela 3.2). Somente dez quadrículas apresentaram o raio do círculo de confiança (θ) superior a 20° . Aproximadamente 70% dos vetores resultantes na porção oriental da área apresentaram ângulos maiores que o azimute médio calculado, sendo nesta porção observados os maiores azimutes gerados ($\approx 150^{\circ}$).

Numa análise mais detalhada, concluiu-se que os vetores resultantes do primeiro tratamento (Fig. 3.4-a) simbolizam a predominância do número de azimutes medidos em um ou outro quadrante; ou seja, quando o vetor resultante obtido em uma quadrícula no tratamento I apresentou azimute menor que 90° , predominaram os azimutes do primeiro quadrante (0° a 90°) no cômputo do vetor resultante, e quando o azimute do vetor resultante foi maior que 90° , predominaram os azimutes do segundo quadrante (90° a 180°). Quanto mais divergente for o azimute do vetor resultante no tratamento I, maior a influência de azimutes de um ou outro quadrante. Com base nisto, pode-se detectar zonas preferenciais de fraturas N-W ou N-E, como na porção sudoeste da área, onde visivelmente predomina a orientação N-E (Fig. 3.4-a).

A seguir são apresentados os mapas de superfície de tendência, os respectivos mapas de desvíos e as discussões a respeito dos resultados obtidos para cada tratamento. Os mapas de tendência de grau dois foram suprimidos por apresentarem resultados intermediários pouco significativos. Saliente-se que somente a tendência de grau 3 do tratamento II e a de grau 1 no tratamento III mostram, através da análise de variância (a nível de 5%), haver uma relação entre os azimutes dos vetores resultantes e as coordenadas geográficas da área.

a. Tratamento I (Todos os Azimutes)

Nos mapas das superfícies de tendência de 1° e de 3° graus do tratamento que envolveu os azimutes de todas as fraturas mapeadas (Fig. 3.5), verifica-se que a aderência do polinômio que gerou a superfície de tendência linear aos dados observados é muito baixa ($R = 0.28$). Isto confere pouca confiabilidade a esta superfície de tendência (Fig. 3.5-a). Mas, como primeira aproximação, pode-se visualizar que a tendência é de predominar fraturas com azimutes maiores de 90° no sentido de sudeste para noroeste.

A superfície de tendência cúbica (Fig. 3.5-b) apresenta um coeficiente de correlação de 0.43, o que é ainda considerado baixo. Observa-se no mapa uma tendência de predominarem fraturas com azimutes maiores que 90°, do centro da área em sentido sul, sudeste e noroeste (mais acentuadamente) enquanto que fraturas com azimutes menores que 90° tendem a predominar na faixa sudoeste-nordeste da área, com tendência acentuada na porção leste.

Os respectivos mapas dos resíduos das superfícies de tendência de 1° e 3° graus, apresentam, como já era de esperar, desvios elevados, dada a fraca aderência dos dados à tendência calculada. Isto faz com que se torne pouco confiável qualquer inferência a respeito das orientações das fraturas, em escala regional, com os resultados obtidos neste tratamento.

b. Tratamento II (Azimutes de 0° a 90°)

No tratamento II (Fig. 3.6), o coeficiente de correlação da tendência linear é novamente baixo ($R = 0.28$). O padrão das isolinhas dessa superfície de tendência (Fig. 3.6-a) assemelha-se ao obtido no tratamento I, denotando novamente uma tendência crescente para noroeste. O mapa de resíduos da superfície de tendência de 1° grau apresenta desvios eleva-

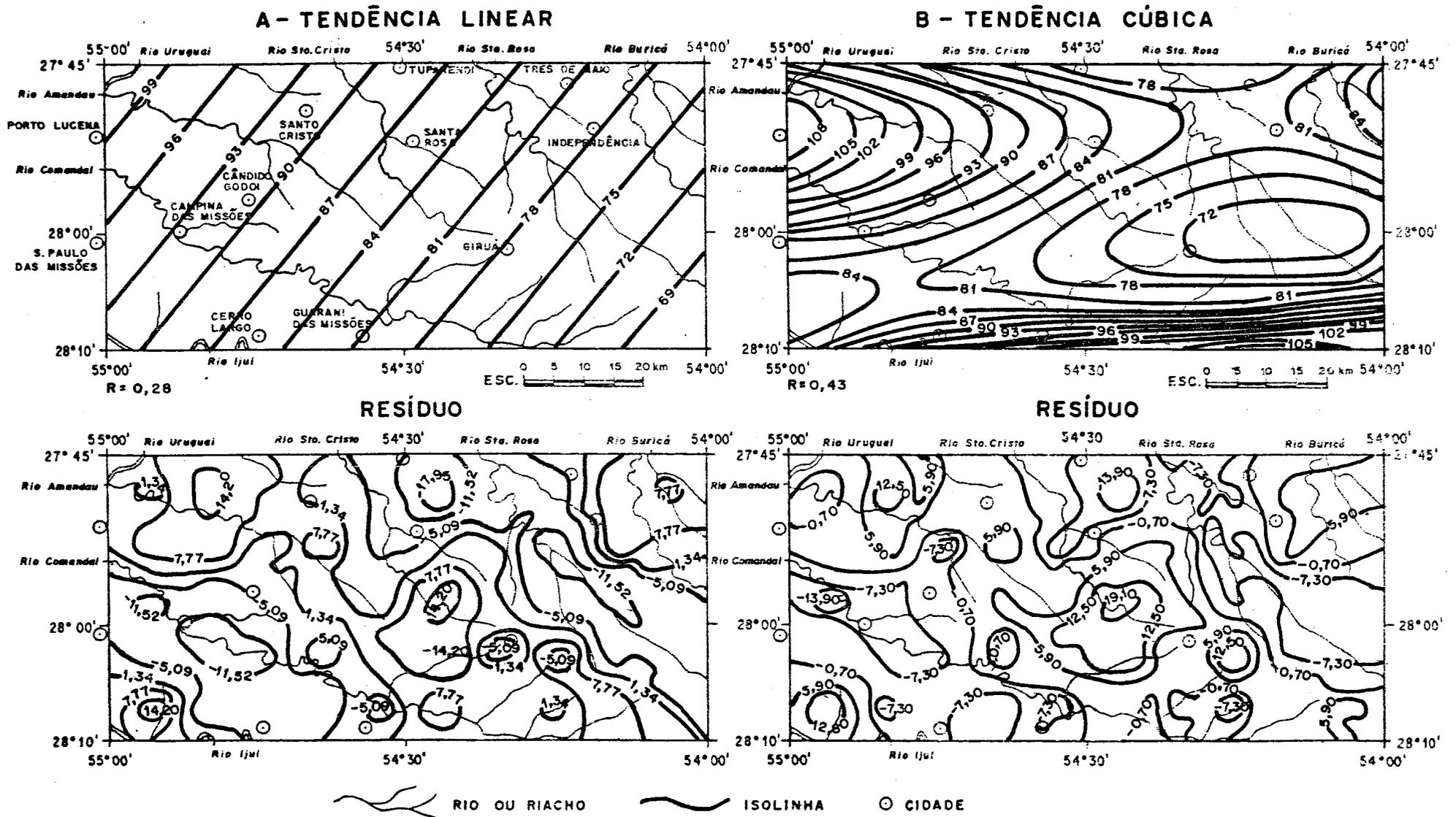


FIGURA 3.5 - MAPAS DE TENDÊNCIA DE 1º E 3º GRAU E OS RESPECTIVOS MAPAS DE RESÍDUOS DOS AZIMUTES DAS LINEAÇÕES NO TRATAMENTO I

dos dada a baixa aderência da superfície de tendência.

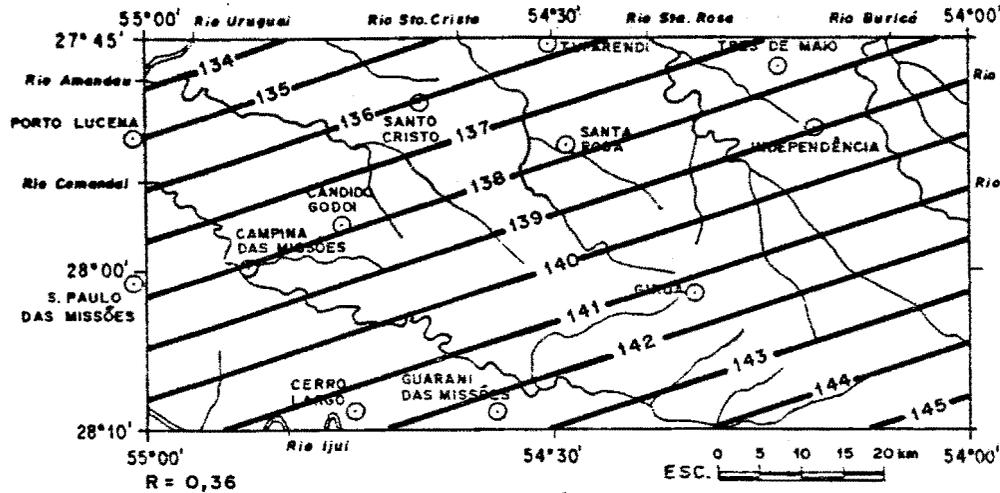
A superfície de tendência cúbica (Fig. 3.6-b) apresenta um coeficiente de correlação significativamente melhor ($R=0.66$), que é o maior coeficiente de correlação obtido nas análises de tendência vetorial. Neste mapa percebe-se que a tendência é a de predominar as fraturas com azimutes $34^{\circ} \pm 2^{\circ}$ na grande zona central da área. As porções oeste e extremo nordeste da área apresentam-se com tendências crescentes dos azimutes em relação ao azimute médio desse quadrante. O inverso ocorre nas porções norte, sudeste e sudoeste, o que parece refletir os azimutes médios dos cursos secundários dos rios Santo Cristo e Amandau, ao norte, e Comandaí, a sudeste e a sudoeste. No respectivo mapa de resíduos pode-se observar que existe uma faixa norte-sul na porção central da área que apresenta as maiores anomalias positivas, além de uma pequena área na porção oeste, próximo a Porto Lucena. Nesta mesma área, somente um pouco mais ao sul, ocorre uma zona de pico negativo denotando a superestimação da tendência, a qual estima valores superiores a 40° para os azimutes.

c. Tratamento III (Azimutes de 90° a 180°)

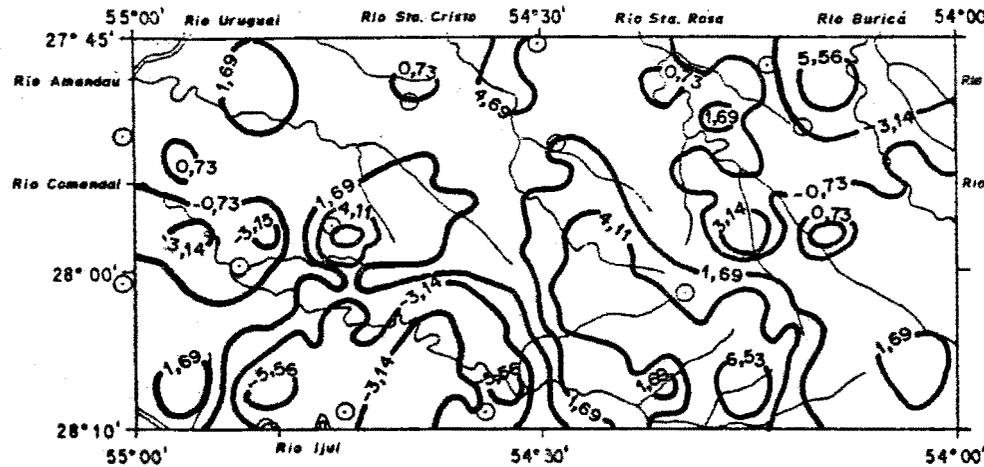
No tratamento III (Fig. 3.7), o padrão da superfície de tendência linear (Fig. 3.7-a) destoa dos obtidos nos tratamentos anteriores, pois apresenta como tendência um aumento dos azimutes do segundo quadrante de noroeste para sudeste, com as isolinhas tendendo para uma disposição quase leste-oeste. O coeficiente de correlação da tendência linear é baixo ($R = 0.36$).

A superfície de tendência cúbica (Fig. 3.7-b), cujo coeficiente de correlação é igual a 0,50, apresenta um padrão bem definido dos azimutes, salientando um foco na região leste e sudeste (município de Giruá), cuja tendência regional é a de apresentar fraturas com os maiores azimutes da área ($< 140^{\circ}$). Isto é concordante com os azimutes, em escala regio

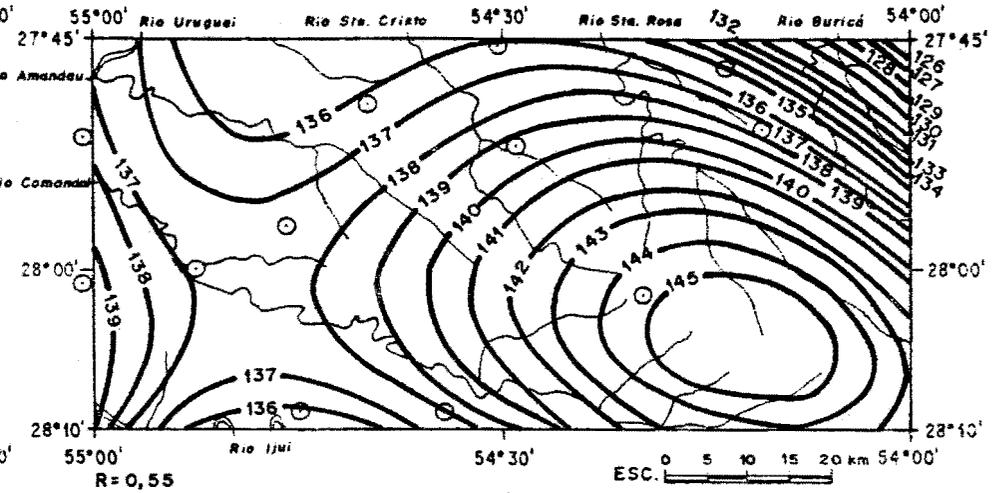
A - TENDÊNCIA LINEAR



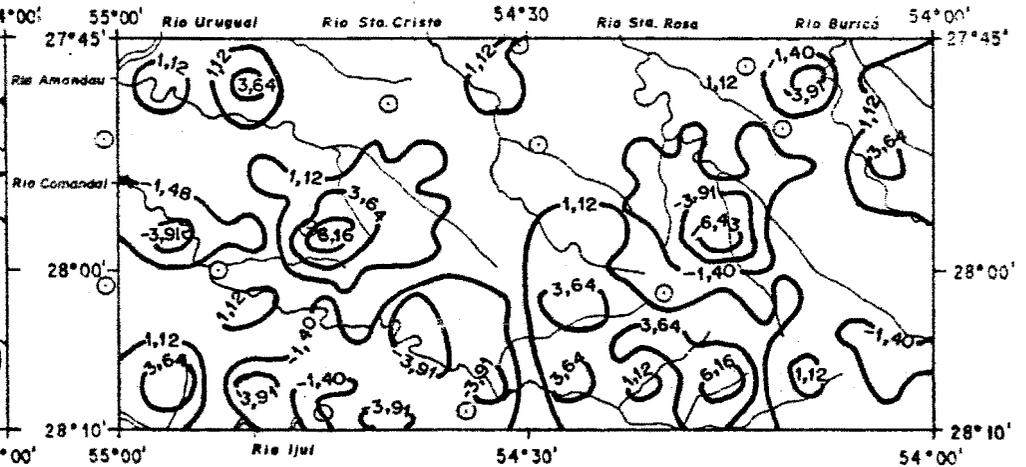
RESÍDUO



B - TENDÊNCIA CÚBICA



RESÍDUO



 RIO OU RIACHO
  ISOLINHA
  CIDADE

FIGURA 3.7 - MAPAS DE TENDÊNCIA DE 1º E 3º GRAU E OS RESPECTIVOS MAPAS DE RESÍDUOS DOS AZIMUTES DAS LINEAÇÕES NO TRATAMENTO III

nal, das calhas principais dos rios Santa Rosa e Santo Cristo, ambos com azimutes de $145^{\circ} \pm 5^{\circ}$, na área em questão. De maneira semelhante, as áreas cuja tendência vetorial seja a de prevalecer azimutes menores de 140° , caso da porção oeste, são cortadas por rios cujos azimutes regionais estão contidos entre 90° e 140° , como nos casos do rio Amandau e Comandáí, de azimutes locais iguais a 120° e 115° , respectivamente. Somente a porção nordeste da área (Fig. 3.7-b), com uma tendência acentuada para o decréscimo dos azimutes ($< 140^{\circ}$), não apresentou correspondência direta com a drenagem principal local, no caso o rio Buricá, cuja orientação da calha principal assemelha-se aos dos rios Santa Rosa e Santo Cristo.

Pelo mapa de resíduos da superfície de tendência cúbica observa-se que os maiores focos de anomalias negativas ocorrem nos municípios de Cerro Largo, Giruá e Campina das Missões, (parte oeste) e municípios de Três de Maio e Independência. É também em Giruá, assim como em Cândido Godói e em Santo Cristo, que ocorrem as maiores anomalias positivas.

d. Comparação dos Três Tratamentos

Comparando-se os mapas das superfícies de tendência linear dos três tratamentos (Figs. 3.5-a, 3.6-a, 3.7-a), observou-se que:

- o padrão das isolinhas de tendência vetorial são semelhantes nos tratamentos I e II; elas estão dispostas no sentido nordeste-sudoeste, com tendência crescente para noroeste;
- a disposição das isolinhas de tendência do tratamento III é semelhante a dos tratamentos I e II, mas com tendência contrária, crescente para sudeste;

Com base nisto, verificou-se que:

- a medida que aumenta a tendência de predominar os azimutes do quadrante leste-sul sobre os azimutes do quadrante norte-leste, mais próximos de 90° são os azimutes em relação às suas médias;
- existe uma constância no ângulo formado entre os alinhamentos analisados nos tratamentos II e III; em estudo pormenorizado dos azimutes dos vetores resultantes nestes dois tratamentos (Figs. 3.4-b e 3.4-c) obteve-se como ângulo médio 104° entre os dois sistemas de orientação, com desvio padrão de $10,5^{\circ}$.

As superfícies de tendência de grau três dos tratamentos I e II (Figs. 3.5-b e 3.6-b) são algo semelhantes, parecendo que ocorreu somente uma pequena rotação de uma em relação à outra. Em ambos os mapas a tendência dos azimutes é de crescer em sentido oeste e nordeste, assim como decrescer em sentido norte e sudoeste, sendo que ambas as tendências apresentam suas maiores anomalias positivas na porção central da área.

Comparando-se os mapas de superfície de tendência de grau três dos tratamentos I e III (Figs. 3.5-b e 3.7-b), observa-se que, na porção oriental da área da pesquisa, quando as fraturas de azimutes menores que 90° predominam acen-tuadamente sobre as fraturas com azimutes entre 90° e 180° , estas últimas apresentam seus maiores azimutes ($> 140^{\circ}$).

3.5. ANÁLISE DAS FREQUÊNCIAS DAS ORIENTAÇÕES

Foram analisados os 328 azimutes das fraturas detectadas pela análise das imagens de radar e fotografias aéreas.

Pelo diagrama de setores (Fig.3.8), percebe-se que os azimutes de maior frequência são os contidos entre 20° -

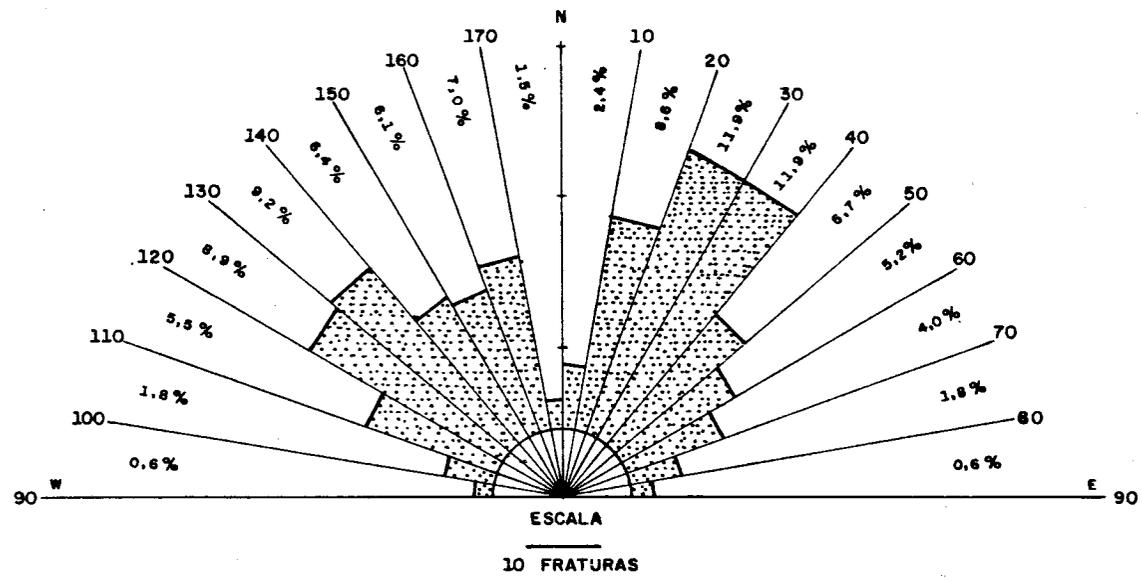


FIGURA: 3.8 - DIAGRAMA DE SETORES ,(E FREQUÊNCIA) DAS DIREÇÕES DAS LINEAÇÕES .

40°, aparecendo logo após os azimutes contidos entre 120°-140°. Nota-se que o ângulo entre os valores médios desses dois setores assemelha-se com o obtido quando da análise de tendência vetorial dos azimutes, ou seja, 100°. Outro fato significativo é o de ambas as direções de maior frequência, são coincidentes com os sistemas regmáticos principais de fraturamento do final do ciclo brasileiro definido por JACKSON (1973). Também verifica-se a compartimentação detectada por SOARES et al. (1981). Tem-se:

- Direção Médio Paraná : N 35 ± 5 E (12,0%)
- Direção Médio Ivaí : N 45 ± 5 W (9,0%)
- Direção Goioxim : N 25 ± 5 W (6,1%)

As outras direções (compartimentações) propostas pelos autores supracitados apresentaram pequena frequência na área da presente pesquisa. Outros setores que apresentaram frequências significativas foram:

- N 25 ± 5 E (12,0%)
- N 15 ± 5 E (8,6%)
- N 55 ± 5 W (9,0%)
- N 15 ± 5 W (7,0%)
- N 35 ± 5 W (6,4%)

Estes oito setores perfazem 70% de todos os azimutes compilados, a nível regional, na área do projeto.

Considerando que a área em questão não deve ter sofrido grandes basculamentos quando do assentamento isostático do pacote de rochas vulcânicas até os tempos atuais, verifica-se que as lineações mapeadas parecem refletir o sistema de fraturamento do embasamento, pois o padrão das orientações detectado assemelha-se às orientações de falhas tensionais pré-Serra Geral, de direções NNE-SSW e NW-SE.

3.6. RELAÇÃO ENTRE A DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL E A ORIENTAÇÃO DOS DADOS ESTRUTURAIS

Comparando-se os mapas de tendência linear (1° grau) das análises da distribuição espacial e das orientações das fraturas (Figs. 3.2-a, 3.5-a, 3.6-a e 3.7-a), nota-se que as isolinhas Densidade de Fraturamento (DF) apresentam o mesmo padrão das isolinhas de tendência vetorial dos tratamentos I e II, mas com sentido da tendência contrário, semelhante ao do tratamento III da análise das orientações das fraturas. Num primeira aproximação, pode-se inferir que nas áreas onde a densidade de fraturamento tende a ser menor, prevalecem as fraturas com azimutes entre 90° a 180°, sendo que dentre estas predominam as com azimutes menores que 140°.

Quando comparado os mapas de tendência cúbica (3° grau) da distribuição e das orientações das fraturas (Figs. 3.3, 3.5-b, 3.6-b e 3.7-b), o quadro torna-se mais complexo e distinto do apresentado pelas superfícies de tendência linear. Observou-se que na porção nordeste, região com tendência a ser bastante fraturada, os alinhamentos tendem a apresentar azimutes com valores próximos a 90°. A porção centro-sul da área pesquisada, também uma região de alta densidade de fraturamento, apresenta-se como área onde há pequena tendência de predominarem os alinhamentos N-E sobre os N-W, sendo que ambos estão aí representados com seus azimutes médios: 35° e 140°, respectivamente. Nas regiões oeste e noroeste, área com menor densidade de fraturamento, tende a predominar os lineamentos N-W, com os valores dos azimutes próximos a 140°. Os lineamentos N-E aí presentes tendem a apresentar azimutes inferiores a 36° (azimute médio neste quadrante), a noroeste, mas tendendo a valores superiores à média à oeste.

Com base no já exposto e lembrando-se que qualquer observação feita com base nos mapas de tendência de 3° grau,

se revestem de maior confiabilidade dado ao melhor ajuste das superfícies de tendência cúbica aos dados observados do que as superfícies de tendência linear, pode-se inferir que é a maior ou menor ocorrência de fraturas com orientação N-E o fator principal na caracterização da densidade de fraturamento das regiões na área pesquisada.

CAPÍTULO 4

TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS PARÂMETROS DO AQUÍFERO

4.1. GENERALIDADES

Na análise dos parâmetros de um aquífero fraturado, deve-se atentar às limitações da interpretação de toda e qualquer observação, dada a natureza complexa do comportamento e da circulação das águas em tal meio. Ainda, com base no exposto sobre águas subterrâneas em rochas efusivas, conclui-se que todo o dado observado é único, seja ele físico ou químico, do aquífero ou da água que por ele circula; ou seja, o dado necessariamente é um valor pontual.

Por outro lado, admitindo-se o meio fraturado como contínuo, tendo por base a densidade de fraturamento num volume elementar representativo de escala regional, pode-se projetar, por métodos estatísticos ou outros, os valores dos parâmetros como representativos de uma determinada área de abrangência. Desse modo, simplifica-se o meio fraturado, com o objetivo de obter-se um esboço de distribuição espacial e da interligação de alguns parâmetros para a caracterização do aquífero.

Com o objetivo supracitado fez-se análises de alguns parâmetros do aquífero fraturado da Formação Serra Geral. Empregou-se, para tal, técnicas estatísticas multivariantes, denominadas Análise de Agrupamento e Análise Fatorial. Primeiramente, por análise de agrupamento, procurou-se detectar e agrupar as amostras (poços) que apresentassem similaridade entre si, levando em conta as variáveis medidas. Os grupos assim obtidos foram submetidos à análise fatorial, visando estudar o comportamento da variabilidade das variáveis nos grupos.

4.2. DADOS

Os dados aqui empregados foram os disponíveis nas fichas cadastrais dos poços até então perfurados na área pela Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN) e pela Secretaria de Desenvolvimento e Obras Públicas (SDO). Vale lembrar que os parâmetros mais representativos de um aquífero (vazão, transmissividade e armazenamento), tais como medidos atualmente pelos órgãos responsáveis, revestem-se de uma incerteza muito grande; portanto, os dados empregados foram selecionados de maneira a ~~ab~~anglobar alguns dos parâmetros que, além de serem representativos de um meio fraturado, expressassem maior confiabilidade. As variáveis selecionadas foram:

- número de entradas d'água NEA
- profundidade da última entrada d'água (metros) PUEA
- descarga específica (metros cúbicos/dia/metro) q
- concentração de íons hidrogênio na água pH
- indicador geoquímico (relação Cl/CO₃H) IG
- sólidos totais (mg/l) ST
- espessura do elúvio (metros) E

Os dados de caráter hidrodinâmico (q) e os representando os fatores hidrofisicoquímicos (pH, IG e ST) foram inicialmente submetidos à uma análise de consistência, eliminando-se valores anômalos, ora devidos a erro de análise, ora por problemas de coletas. Foram também preenchidas eventuais falhas nos dados existentes através de análises de correlação. Os dados empregados na presente pesquisa estão listados no ANEXO.

Salienta-se ainda que, se outros parâmetros não foram analisados, deveu-se à inexistência ou escassez desses nas fichas cadastrais.

4.3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

As análises estatísticas multivariantes permitem considerar as variações em diversas propriedades simultaneamente (DAVIS, 1973), ou seja, fornece informações na razão direta do número de variáveis utilizadas, considerando, ao mesmo tempo, a variabilidade nas diversas propriedades medidas e a relação entre estas variáveis (SILVA, 1984).

Algumas aplicações de análises por técnicas multivariantes na área de geologia e hidrogeologia podem ser encontradas na literatura brasileira, tais como: RUEGG & MACEDO (1974), LANDIM & BETTENCOURT (1974), LANDIM et al. (1979), NETO & CAMPOS (1980), SAMBERG (1980) OGAWA & CAMPOS (1982) e SILVA (1984).

A seguir são descritos os princípios básicos das técnicas geomatemáticas para dados multivariantes empregadas neste trabalho.

4.3.1. Análise de Agrupamento

A análise de agrupamento é uma das técnicas multivariantes empregadas para analisar a similaridade entre indivíduos caracterizados por variáveis. Por este método são definidos grupos de indivíduos com determinado grau de similaridade, sendo considerado simultaneamente todas as variáveis de cada indivíduo (DAVIS, 1973). Por agrupamento de grupos de itens, representados por pontos num espaço n-dimensional, procura-se um número conveniente de grupos, relacionados através de coeficientes de similaridade (NETO & CAMPOS, 1982).

Para análise de agrupamento, parte-se de uma matriz inicial simétrica, formada de coeficientes de associação (similaridade) entre itens. Em seguida, grupos iniciais de semelhança (com maiores coeficientes de similaridade) são encon-

trados, os quais admitirão, posteriormente, novos membros, em ordem sucessiva no sentido de decréscimo de similaridade, até que todos os indivíduos estejam corretamente correlacionados (agrupados).

Embora várias medidas de similaridade tenham sido propostas, somente duas geralmente são empregadas. São elas: o coeficiente de correlação linear do produto momento (Pearson), que procura detectar a similaridade existente entre as variáveis (modo R), e o coeficiente de distância, usado para testar a similaridade entre indivíduos (modo Q). Como o objetivo nesta primeira fase é verificar semelhanças entre as amostras (poços), empregou-se o coeficiente de distância.

O coeficiente de distância expressa o grau de similaridade como distância, baseando-se na forma generalizada do teorema de Pitágoras. Quanto maior for a distância, menor o grau de similaridade, e vice-versa. O coeficiente de distância é calculado por:

$$d_{ij} = \sqrt{\frac{\sum_{K=1}^m (X_{ik} - X_{jk})^2}{m}} \quad (4.1)$$

onde:

- d_{ij} = coeficiente de distância entre as amostras;
- X_{ik} = K'ésima variável na amostra i;
- X_{jk} = k'ésima variável medida na amostra j;
- m = número de variáveis.

A forma usual para a representação gráfica mostrando o relacionamento das amostras é o dendrograma (ou diagrama ramificado), o qual projeta, num espaço a duas dimensões, o agrupamento hierárquico.

O processo de quantificar junto os itens de um grupo e tratá-los como um único novo item introduz distorções no

diagrama, distorções que se tornam crescentes com os sucessivos níveis de agrupamento (DAVIS, 1973). Tal distorção pode ser medida por um coeficiente de correlação, chamado fonético, entre os valores da matriz inicial de similaridade e os valores de similaridade extraídos do dendrograma.

4.3.2. Análise Fatorial

Uma vez estabelecidos os grupos pelo método de análise de agrupamento, pode-se, para cada grupo, estabelecer uma matriz de dados $X(n,m)$ onde "n" é o número de observações e "m" o número de variáveis. O problema básico é determinar "p" combinações lineares das "m" variáveis que descrevem as amostras sem significativa perda de informações, sendo $p < m$; ou seja, pergunta-se se é possível reduzir a dimensão inicial "m" do problema através de novas variáveis hipotéticas que, mesmo em menor número, expliquem a maior parte da variação original.

A análise de fatores consiste em uma técnica estatística de dados multivariantes que procura verificar o número mínimo de causas (fatores) necessários para explicar ao máximo a variabilidade observada em um conjunto de dados, além de verificar a contribuição relativa de cada uma delas; ou seja, supõe que as relações existentes dentro de um conjunto de "m" variáveis seja o reflexo da correlação de cada uma das variáveis com "p" fatores, mutuamente não correlacionados entre si, e que expliquem a maior parte da variância do conjunto original (DAVIS, 1973).

A relação básica da análise de fatores, para uma variável, é dada pela equação (KLOVAN, 1975):

$$x_i = a_{1i}F_1 + a_{2i}F_2 + \dots + a_{pi}F_p + a_iF_i \quad (4.2)$$

A equação exprime que qualquer variável x_i ($i=1, 2, \dots, m$) consiste em uma combinação linear de "p" fatores comuns (por serem comuns a várias variáveis), mais um fator único (ou residual), próprio somente a variável em questão. O modelo fatorial contém "m" equações; uma para cada variável. Na forma matricial pode-se escrever (RUEGG et al., 1974):

$$X_{n,m} = F_{n,p} \cdot A_{m,p} + E_{n,m} \quad (4.3)$$

onde:

n = número de observações;

m = número de variáveis;

p = número de fatores capaz de explicar a variabilidade dos dados;

$X_{n,m}$ = matriz inicial dos dados;

$F_{n,p}$ = matriz dos coeficientes fatoriais, descrevendo as "n" observações como proporções de "p" membros finais;

$A_{m,p}$ = matriz das cargas fatoriais que descrevem a composição de cada um dos fatores como combinações das "m" variáveis;

$E_{n,m}$ = matriz da variabilidade não representada por F

Uma linha da matriz $A_{m,p}$ (cargas fatoriais) mostra como a variância de uma variável é distribuída entre os fatores comuns. Assim, o montante da variação de uma variável contida por "p" fatores pode ser obtida pela soma dos quadrados das cargas fatoriais dessa variável. Isto é denominado de "comunalidade" (DAVIS, 1973), e é expressa como:

$$h_i^2 = \sum_{k=1}^p a_{ki}^2 \quad (4.4)$$

A comunalidade indica a influência de cada fator na explicação da variabilidade total, além de refletir a proporção da contribuição de cada variável na variância total. A magnitude da comunalidade depende do número de fatores que são retidos.

O objetivo da análise fatorial não é somente minimizar o número de fatores comuns, mas também de determinar o número ótimo desses fatores, seja ele pequeno ou grande (MATALAS & REINHER, 1967). Segundo CATTELL (1965) são três as maneiras de se determinar o melhor número de fatores comuns: por conceitos matemáticos, por desenvolvimento estatístico ou pelo critério estrutural dos fatores. Optou-se por critérios estatísticos, ou seja, de reter tantos fatores quanto fossem necessários para explicar uma porcentagem satisfatória do total da variância original. DAVIS (1973) recomenda reter os fatores que tenham autovalores ("Eigenvalues") maiores que um (maior variância que as variáveis originais), mas não mais que três fatores, pois é o número máximo para uma conveniente amostragem em diagramas.

Deve-se salientar que, na análise de fatores, todas as variáveis são expressas em termos de vetores em um sistema de coordenadas ortogonais onde o comprimento do vetor representa a magnitude da variável. Estes vetores agrupar-se-ão conforme o relacionamento entre si. Por este agrupamento poderão passar eixos (fatores) cujas determinação é obtida através de técnicas de cálculo matricial (autovalores e autovetores). Os autovalores resultantes deverão definir um vetor de comprimento unitário.

Pode-se analisar e interpretar os fatores plotando as cargas fatoriais em um diagrama cujos eixos sejam os fatores. Para "p" fatores deverá haver $p(p-1)/2$ gráficos. Obtém-se, assim, uma visualização do significado físico dos fatores.

Embora a análise de fatores reduza a dimensão de um problema, a interpretação dos fatores comuns pode ser difícil. A dificuldade deve-se ao padrão de carregamento de cada componente. Há, por vezes, a necessidade de uma rotação dos eixos fatoriais, de maneira a colocá-los em uma posição tal que cada fator possa ser interpretado pelos maiores carregamentos possíveis e relacionados com o menor número de variáveis possível. A técnica usualmente empregada para rotar os eixos fatoriais é a chamada "esquema varimax de Kaiser", que se constitui em uma rotação ortogonal. O critério varimax (máxima variância) envolve a maximização das cargas nos fatores.

Por fim, pode-se estimar os valores dos fatores comuns para cada indivíduo em função das variáveis observadas, ou seja, conhecer as contribuições dos vários fatores a cada observação original. Estes valores constituem os escores fatoriais e são obtidos através da multiplicação da matriz fatorial rotada pela matriz inicial dos valores.

4.4. PROCEDIMENTOS

Para o processamento dos dados pelas análises geométricas multivariantes empregou-se programas de computador já desenvolvidos por DAVIS (1973). Para a análise de agrupamento hierárquico usou-se o programa CLUSTER, e para a análise de fatores empregou-se o programa FACTOR. Ambos os programas estão em linguagem FROTRAN IV e adaptados para o computador A-10 Burroughs.

Os dados empregados provêm das fichas cadastrais de sessenta e oito poços com ampla distribuição na área pesquisada. A seguir são apresentados os resultados e as discussões a respeito das análises realizadas.

4.5. ANÁLISE DE AGRUPAMENTO

Foram analisados sessenta e oito poços, sendo cada poço caracterizado por sete variáveis (Tabela 4.1). Os valores dessas variáveis foram padronizados de maneira a ficarem compreendidos no intervalo de 1 a 2; isto visou o equilíbrio de peso que cada variável terá dentro do procedimento da análise. A medida de similaridade empregada foi o coeficiente de distância.

Pela observação do dendrograma (Fig. 4.1), nota-se que, ao nível de similaridade de 0.3, os poços agregam-se em cinco grupos básicos. A Tabela 4.1 apresenta os valores característicos das variáveis nestes grupos.

A Fig. 4.2 mostra, de maneira esquemática e valendo-se da mesma malha estabelecida quando da análise dos dados estruturais, a distribuição espacial de cada elemento dos grupos obtidos na análise de agrupamento. Observa-se aí que o grupo I apresenta-se quase que totalmente concentrado na porção ocidental da área, próxima ao rio Uruguai. Nesta mesma porção estão inseridos todos os poços do grupo II, dispostos segundo uma linha reta noroeste-sudeste. Os poços do grupo III concentram-se próximo à porção central da área, enquanto que os do grupo IV se encontram amplamente distribuídos por toda a área pesquisada. Já o grupo V acha-se inserido na porção oriental, concentrando-se principalmente a nordeste.

4.6. ANÁLISE FATORIAL

Análises fatoriais foram efetuadas para os cinco grupos obtidos pela análise de agrupamento. A opção empregada foi a de verificar a similaridade entre as amostras (modo-R). A medida de similaridade empregada foi o coeficiente de correlação (Pearson).

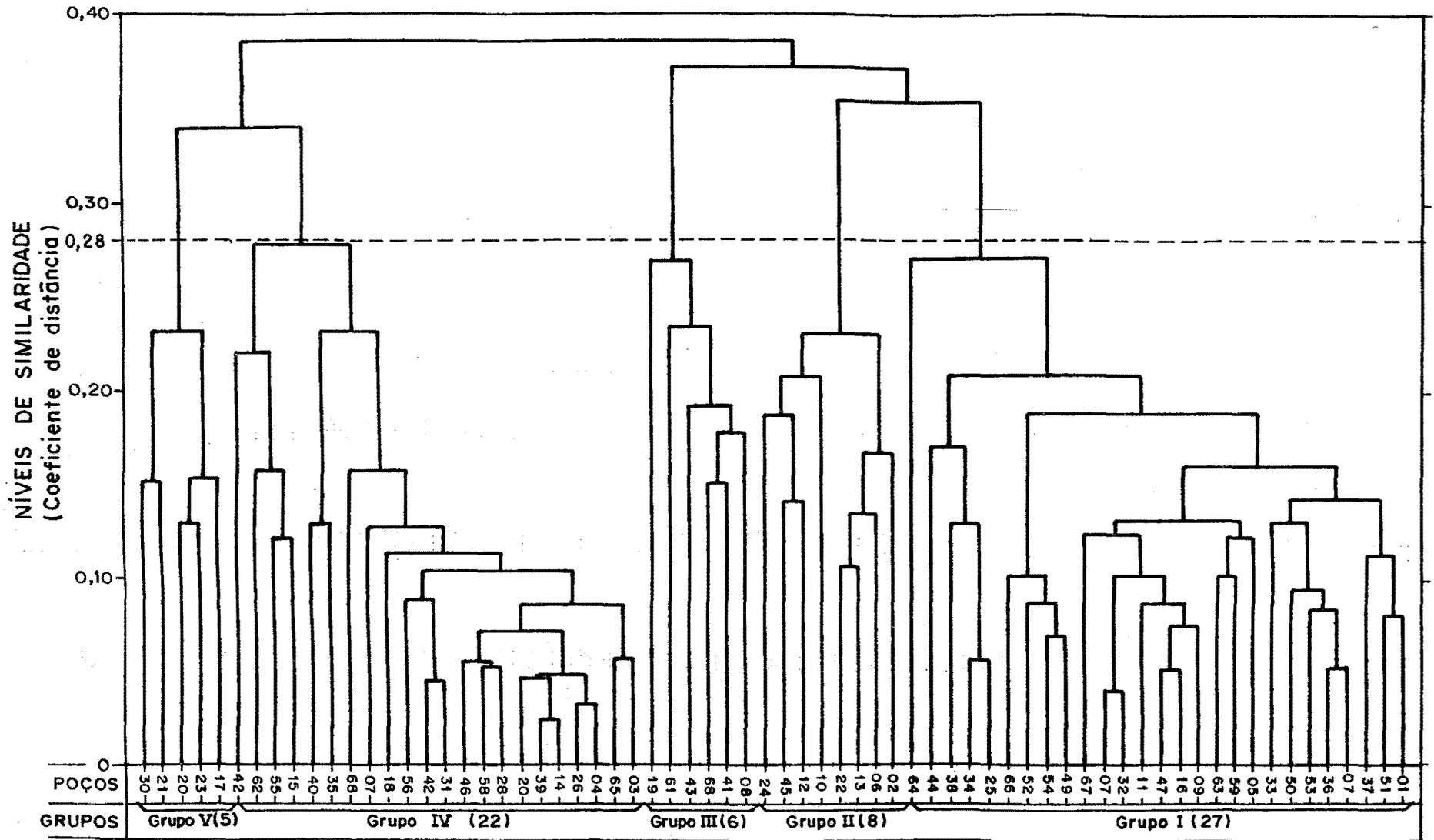


FIGURA 4.1 - DENDROGRAMA DE AMOSTRAS COM DADOS HIDROGEOLÓGICOS

Tabela 4.1 - Valores característicos das variáveis empregadas nas análises multivariantes, discretizadas nos grupos identificados pela análise de agrupamento e no total das amostras.

E S T A T Í S T I C A S							
VARIÁVEIS		GRUPO I	GRUPO II	GRUPO III	GRUPO IV	GRUPO V	TOTAL
Número de amostras		27	8	6	22	5	68
NEA	\bar{X}	2	2	3	3	3	2
	s	0.7	0.5	1.5	1.3	1.4	1.0
	mín.	1	1	2	2	2	1
	máx.	3	3	5	6	5	6
FUEA (m)	\bar{X}	51.1	145.7	60.2	58.2	52.0	66.5
	s	24.8	34.4	40.1	44.9	25.8	45.4
	mín.	13.0	103.0	30.0	22.0	29.0	13.0
	máx.	102.0	202.0	132.0	165.0	94.0	202.0
q ($m^3/d/m$)	\bar{X}	27.7	7.0	49.5	20.3	20.5	37.2
	s	35.6	4.6	43.5	17.9	10.6	63.4
	mín.	1.8	0.8	9.7	0.6	5.7	0.6
	máx.	120.0	14.0	131.9	79.6	33.6	131.9
pH	\bar{X}	7.6	9.2	8.0	7.2	7.1	7.6
	s	0.5	0.7	1.0	0.8	0.5	0.9
	mín.	6.4	8.2	7.0	6.2	6.6	6.2
	máx.	8.7	10.0	9.7	9.2	7.9	10.0
IG	\bar{X}	0.031	0.030	0.085	0.043	0.059	0.04
	s	0.022	0.020	0.043	0.037	0.039	0.04
	mín.	0.010	0.015	0.037	0.008	0.035	0.00
	máx.	0.108	0.075	0.160	0.172	0.126	0.17
RS (mg/l)	\bar{X}	222.6	382.1	187.7	154.2	99.8	213.8
	s	68.4	98.0	77.5	45.9	24.2	113.0
	mín.	105.5	236.1	102.8	66.8	73.0	66.8
	máx.	378.7	527.5	312.7	242.0	125.0	527.5
E (m)	\bar{X}	5.3	4.8	6.1	7.6	28.0	7.5
	s	2.2	3.3	6.1	4.4	5.0	6.8
	mín.	0.3	1.4	0.8	3.0	24.0	0.3
	máx.	9.0	12.0	18.0	18.0	36.0	36.0
NEA = Número de Entradas d'Água. PUEA = Profundidade da Última Entrada D'Água. q = Descarga Específica. pH = Concentração de Íons Hidrogênio em Solução. IG = Indicador Geoquímico (Cl/CO ₃ H). ST = Sólidos Totais. E = Espessura do Manto de Alteração (Elúvio)							

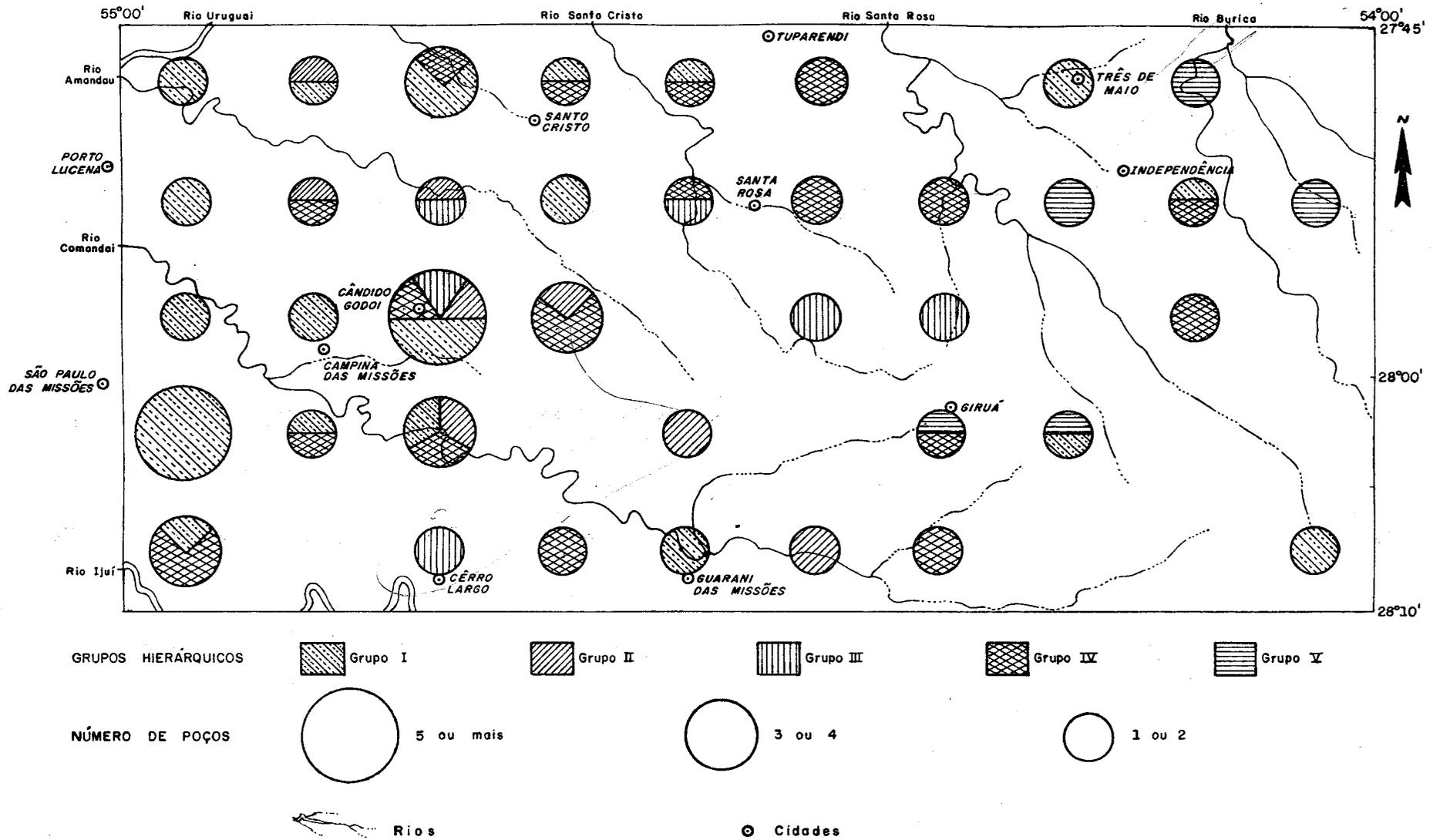


FIGURA 4.2 - MAPA ESQUEMÁTICO DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS GRUPOS HIERÁRQUICOS.

Em todas as análises foram retidos três fatores comuns, pois foi este o número mínimo de autovalores que continham um valor percentual significativo ($> 70\%$) da variância total das variáveis. Isto se deveu, possivelmente, ao fato de a variabilidade total dos grupos se distribuir de maneira mais ou menos uniforme entre as variáveis, não havendo influência acentuada por uma ou outra variável somente.

A seguir, apresenta-se os resultados obtidos e as respectivas discussões sobre a análise fatorial de cada um dos grupos propostos.

4.6.1. Grupo I

Formado por vinte e sete amostras, o grupo I se constituiu no maior grupo analisado. O maior coeficiente de similaridade (último nível de agrupamento) é igual a 0,27, o que indica um bom grau de semelhança entre as amostras.

Ao analisar-se a matriz dos coeficientes de correlação das variáveis deste grupo (Tabela 4.2-a), observa-se que os valores obtidos são baixos, indicando que as variáveis, neste caso, são independentes entre si. Os autovalores (Tabela 4.2-b) sugerem que quatro variáveis determinam a maior parte da variabilidade do sistema (número de entradas de água, profundidade da última entrada de água, descarga específica e o pH). É na ordem de 81% a percentagem de variância total do grupo por elas explicadas.

Observando-se as comunalidades finais de cada variável (Tab. 4.2-c), nota-se que as maiores são devidas à profundidade da última entrada de água, ao número de entradas de água e à espessura do elúvio, o que indica serem estas três variáveis as melhores caracterizadoras do grupo I na sua forma reduzida. A matriz de fatores rotada mostra que o

Tabela 4.2 - Matriz de correlação, estatística da matriz de correlação e estatísticas das matrizes dos fatores não rotada e rotada do grupo I.

quadro a. MATRIZ DE CORRELAÇÃO							
VARIÁVEIS	NEA	PUEA	q	pH	Cl/CO ₃ H	ST	E
NEA	1						
PUEA	0.3616	1					
q	-0.0553	-0.2973	1				
pH	0.2023	-0.1453	-0.4121	1			
Cl/CO ₃ H	0.2550	0.3438	-0.2593	0.0951	1		
ST	0.2028	-0.0433	-0.1623	0.3382	0.3486	1	
E	0.3633	0.0954	0.2246	-0.1999	-0.0299	-0.0841	1

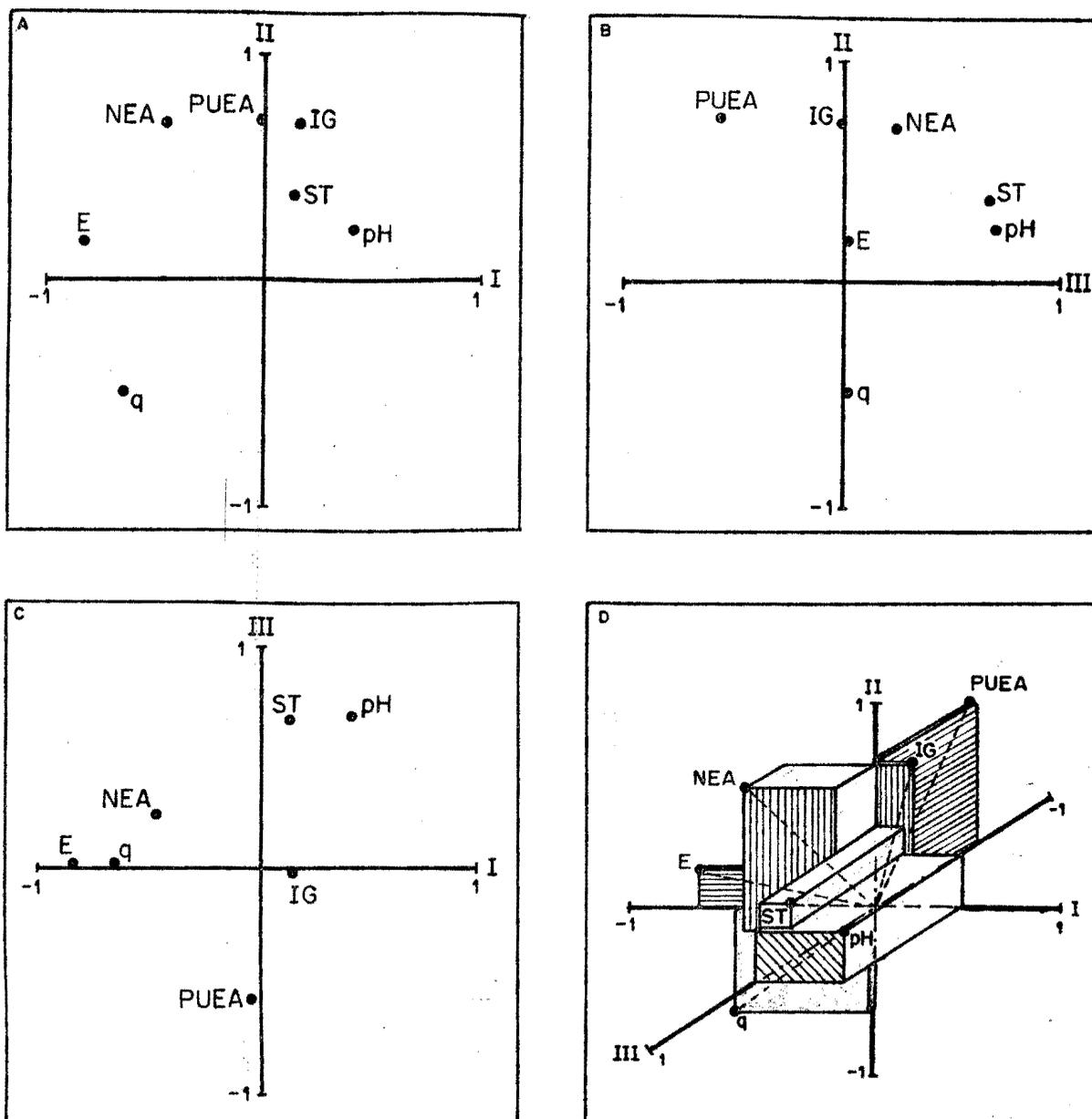
quadro b. ESTATÍSTICAS				
VARIÁVEIS	Fator	Autovalor	% da variância	% acum. da variância
NEA	1	2.0679	29.5	29.5
PUEA	2	1.5963	22.8	52.3
q	3	1.1397	16.3	68.6
pH	4	0.8873	12.7	81.3
Cl/CO ₃ H	5	0.5420	7.7	89.0
ST	6	0.4784	6.8	95.9
E	7	0.2883	4.1	100.0

quadro c. MATRIZ DOS FATORES							
VARIÁVEIS	Não Rotada			Comunalidade final	Rotada		
	fator 1	fator 2	fator 3		fator 1	fator 2	fator 3
NEA	0.5501	0.5615	0.3535	0.7429	-0.4592	0.6912	0.2330
PUEA	0.4815	0.5370	-0.5639	0.8382	-0.0132	0.7150	-0.5717
q	-0.6447	0.3110	0.3970	0.6700	-0.6479	-0.4991	0.0333
pH	0.5477	-0.5134	0.3632	0.6955	0.4122	0.2489	0.6809
Cl/CO ₃ H	0.6850	0.1569	-0.1585	0.5189	0.1625	0.7017	-0.0067
ST	0.5858	-0.2368	0.4652	0.6156	0.1487	0.3857	0.6669
E	-0.0733	0.7427	0.4070	0.7227	-0.8271	0.1943	-0.009
AUTOVALOR	2.068	1.596	1.140				
% VARIANÇA	43.0	33.2	23.7				
% ACUMULADA DA VARIANÇA	42.0	76.3	100.0				

fator um está fortemente relacionado com a espessura do elúvio e a descarga específica, ambas com cargas negativas neste fator. No fator dois combinam-se as variáveis: número de entrada de água, profundidade da última entrada e a relação cloretos/bicarbonatos. Já o fator três é predominantemente de caráter hidrofisicoquímico, combinando as variáveis pH e sólidos totais, além da variável (profundidade da última entrada) que também apresenta carga expressiva, mas negativa, neste fator.

Quanto a distribuição das cargas das sete variáveis sobre os três fatores (eixos) após a rotação (Fig. 4.3), nota-se que as variáveis pH e sólidos totais apresentam comportamento semelhante na distribuição de suas cargas fatoriais, nos três fatores, apesar da correlação entre estas duas variáveis ser baixa ($R = 0.34$). As variáveis espessura do elúvio e relação cloretos/bicarbonatos apresentam um padrão semelhante dos blocos (Fig. 4.3-d), mas com carregamento distinto das cargas sobre os eixos fatoriais, o que indica que estas duas variáveis têm variabilidade bastante distinta entre si neste grupo. O mesmo ocorre entre as variáveis profundidade da última entrada de água e descarga específica.

Duas variáveis chamam a atenção neste grupo pelos valores médios apresentados (Tabela 4.1). São elas: profundidade da última entrada de água e a relação cloretos/bicarbonatos. A primeira apresenta o menor valor médio dos grupos estudados, assim como o menor valor individual observado (13m). O mesmo ocorre com o valor médio da relação cloretos/bicarbonatos. Como o valor dos cloretos é relativamente constante ($\bar{x} = 4,76$ e $s = 3,2$), pode-se concluir que o aporte de bicarbonatos às águas nos poços do grupo I é grande comparado aos valores obtidos nos outros grupos, excessão feita ao grupo II que apresenta comportamento semelhante dessa variável hidroquímica. Ressalte-se também que é neste grupo que encontram-se os menores valores da variável espessura do elúvio; nunca superior a dez metros.



LEGENDA	
PONTOS	EIXOS
NEA - NÚMERO DE ENTRADAS DE ÁGUA	EIXO I - FATOR 1
PUEA - PROFUNDIDADE DA ÚLTIMA ENTRADA DE ÁGUA	EIXO II - FATOR 2
q - DESCARGA ESPECÍFICA	EIXO III - FATOR 3
pH - POTÊNCIAL DE HIDROGÊNIO	
IG - INDICADOR GEOQUÍMICO (Ca/CO_3H)	
ST - SÓLIDOS TOTAIS	
E - ESPESSURA DO ELÚVIO	

FIGURA 4.3 - GRÁFICOS DOS FATORES PRINCIPAIS DA ANÁLISE FATORIAL DO GRUPO I

4.6.2. Grupo II

O grupo II, constituído por oito amostras, apresentou um nítido padrão de ocorrência, pois seus poços encontram-se alinhados segundo uma estreita faixa paralela à diagonal noroeste-sudeste da porção ocidental da área pesquisada. O índice de similaridade do último nível de agrupamento é de 0,23, o que confere um alto grau de ligação das variáveis neste grupo.

Analisando a matriz dos coeficientes de correlação das variáveis neste grupo (Tab. 4.3-a), percebe-se que as variáveis hidroquímicas relação cloretos/bicarbonatos e sólidos totais apresentam uma alta correlação ($R = 0.97$), o que é perfeitamente compreensível, uma vez que os teores de bicarbonatos entram no cômputo de sólidos totais.

Os autovalores (Tab. 4.3-b) mostram que quatro variáveis (número de entrada de água, profundidade da última entrada, descarga específica e pH) determinam a quase totalidade da variabilidade do sistema; aproximadamente 95% da variância total.

Observa-se que somente a variável pH apresentou comunalidade baixa ($h^2_{pH} = 0.57$), o que sugere que o comportamento dessa variável é distinto das outras variáveis neste grupo (Tab. 4.3). Isto é reforçado pelos baixos valores obtidos pelos coeficientes de correlação que envolveram esta variável - (Tab. 4.3-a). Verifica-se que as águas dos poços do grupo II são as mais alcalinas do todo amostrado, apresentando como valor médio 9.2 (Tab. 4.1).

Na matriz fatorial rotada (Tab. 4.3-c) nota-se que o fator um se constitui num fator híbrido, pois está fortemente relacionado com uma variável geológica (número de entradas de água), com uma variável hidrodinâmica (descarga específica) e com uma variável hidrofisicoquímica (pH), sendo esta última

Tabela 4.3 - Matriz de correlação, estatísticas da matriz de correlação e estatísticas das matrizes dos fatores não rotada e rotada do grupo II.

quadro a. MATRIZ DE CORRELAÇÃO							
VARIÁVEIS	NEA	PUEA	q	pH	Cl/CO ₃ H	ST	E
NEA	1						
PUEA	-0.5261	1					
q	0.5774	0.0021	1				
pH	-0.5908	0.0209	-0.0970	1			
Cl/CO ₃ H	0.1105	0.0639	-0.2748	-0.0886	1		
ST	0.1769	-0.0896	-0.3795	-0.1934	0.9740	1	
E	0.0850	-0.4281	-0.4741	-0.0759	0.4474	0.5734	1

quadro b. ESTATÍSTICAS				
VARIÁVEIS	Fator	Autovalor	% de variância	% acum. da variância
NEA	1	2.6729	38.2	38.2
PUEA	2	2.0204	28.9	67.1
q	3	1.2091	17.3	84.3
pH	4	0.7724	11.0	95.3
Cl/CO ₃ H	5	0.3016	4.3	99.7
ST	6	0.0236	0.3	99.9
E	7	0.0001	0.1	100.0

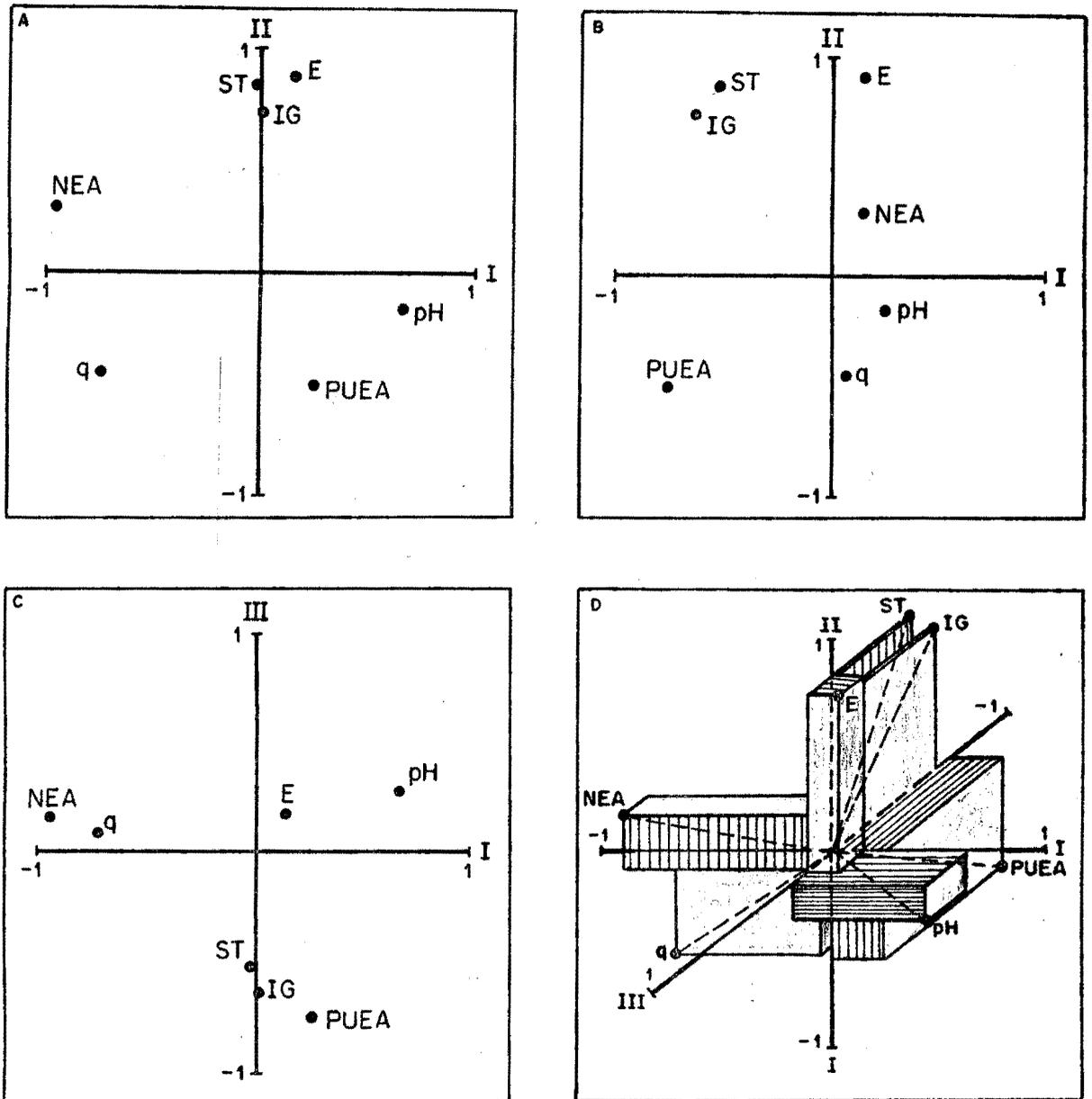
quadro c. MATRIZ DOS FATORES							
VARIÁVEIS	Não Rotada			Comunalidade final	Rotada		
	fator 1	fator 2	fator 3		fator 1	fator 2	fator 3
NEA	0.1979	0.9691	-0.0301	0.9792	-0.9383	0.2738	0.1545
PUEA	-0.2853	-0.4988	-0.7757	0.9319	0.2703	-0.5317	-0.7590
q	-0.4970	0.6633	-0.2426	0.7459	-0.7142	-0.4786	0.0820
pH	-0.2350	-0.6161	0.3738	0.5746	0.6878	-0.1822	0.2614
Cl/CO ₃ H	0.8575	-0.1012	-0.3947	0.9313	0.0117	0.7041	-0.6367
ST	0.9454	-0.0354	-0.2617	0.9636	-0.0149	0.8308	-0.5226
E	0.7880	-0.0367	0.4286	0.8059	0.1652	0.8676	0.1611
AUTOVALOR	2.673	2.020	1.209				
% VARIANÇAS	45.3	34.2	20.5				
% ACUMULADA DA VARIANÇAS	45.3	79.5	100.0				

com comportamento distinto ao das duas primeiras variáveis por apresentar carga com sinal contrário (positivo) neste fator. O fator dois é identificado pelas variáveis: espessura do elúvio, relação cloretos/bicarbonatos e sólidos totais. O fator três apresenta-se fortemente relacionado com a profundidade da última entrada de água e, secundariamente, com as variáveis fisico-químicas: sólidos totais e relação cloretos/bicarbonatos, todas as três com cargas negativas, distintas das cargas fatoriais das outras variáveis deste fator.

A distribuição das sete variáveis nos três eixos fatoriais, mostra a semelhança na distribuição das cargas fatoriais das variáveis sólidos totais e relação cloretos/bicarbonatos, assim como o comportamento completamente inverso entre si das variáveis número de entradas de água e profundidade da última entrada (Fig.4.4).

Observando-se os valores característicos das variáveis neste grupo (Tab. 4.1), pode-se melhor compreender alguns dos resultados obtidos pela análise fatorial. As variáveis número de entrada de água e descarga específica, cujas maiores cargas fatoriais estão no fator um, apresentaram neste grupo seus valores médios mais baixos do total amostrado. A variável pH, com sua maior carga também no fator um, apresentou neste grupo o seu maior valor médio e individual. As três variáveis que caracterizaram o fator dois: espessura do elúvio, relação cloretos/bicarbonatos e sólidos totais, também apresentam valores médios extremos, sendo que as duas últimas variáveis (variáveis fisicoquímicas) mostraram uma variabilidade muito semelhante nos três fatores, devida talvez à relação direta da ocorrência de uma em relação a outra, o que ficou saliente pela alta correlação existente entre ambas as variáveis em questão.

Vale salientar que as variáveis: profundidade da úl



LEGENDA	
PONTOS	EIXOS
NEA - NÚMERO DE ENTRADAS DE ÁGUA	EIXO I - FATOR 1
PUEA - PROFUNDIDADE DA ÚLTIMA ENTRADA DE ÁGUA	EIXO II - FATOR 2
q - DESCARGA ESPECÍFICA	EIXO III - FATOR 3
pH - POTÊNICAL DE HIDROGÊNIO	
IG - INDICADOR GEOQUÍMICO (Cl_2/CO_3H)	
ST - SÓLIDOS TOTAIS	
E - ESPESSURA DO ELÚVIO	

FIGURA 4.4 - GRÁFICOS DOS FATORES PRINCIPAIS DA ANÁLISE FATORIAL DO GRUPO II

tima entrada de água e pH, apesar de apresentarem variabilidades distintas e baixíssimo coeficiente de correlação entre si neste grupo, mostram aqui os maiores valores médios e individuais, o que induz, de maneira subjetiva, a crer na possibilidade de haver uma influência da profundidade das entradas de água sobre o pH da água.

4.6.3. Grupo III

O grupo três é composto por seis amostras, agrupadas a nível de 0,27 como maior coeficiente de similaridade. A distribuição espacial de tais poços (Fig. 4.2) se dá sempre próximo à porção central da área pesquisada.

O grupo III, assim como o grupo V, apresenta um número de amostras menor que o número de variáveis analisadas, o que compromete a eficácia da análise fatorial. Achou-se conveniente assim mesmo, manter a formação original dos grupos III e V pelo fato de ambos, mesmo com um número reduzido de amostras, apresentarem características próprias e distintas das dos outros grupos, além de que, se fossem introduzidos nos grupos vizinhos do dendrograma (Fig. 4.1), acarretariam num coeficiente de similaridade elevado para o último nível de agrupamento dos novos grupos assim formados e numa redução para somente dois grupos para a caracterização hidrogeológica da área.

A matriz dos coeficientes de correlação (Tab. 4.4-a) mostra que as relações cloretos/bicarbonatos e sólidos totais apresentam uma alta correlação, semelhante ao ocorrido no grupo II. Observa-se também que existe uma boa correlação entre o número de entradas de água e as duas variáveis físicoquímicas supracitadas, sendo esta correlação negativa, ou seja, quanto maior o número de entradas de água nestes poços, maiores são as possibilidades dos teores dos sólidos to

Tabela 4.4 - Matriz de correlação, estatísticas da matriz de correlação e estatística das matrizes dos fatores não rotada e rotada do grupo III.

quadro a. MATRIZ DE CORRELAÇÃO							
VARIÁVEIS	NEA	PUEA	q	pH	Cl/CO ₃ H	ST	E
NEA	1						
PUEA	0.5474	1					
q	0.0666	-0.2714	1				
pH	0.2551	0.5468	-0.4095	1			
Cl/CO ₃ H	-0.7264	-0.4176	-0.4601	0.2096	1		
ST	-0.7973	-0.4357	-0.2494	0.0379	0.9491	1	
E	0.0976	-0.6901	-0.0091	-0.4715	0.0992	0.0292	1

quadro b. ESTATÍSTICAS				
VARIÁVEIS	Fator	Autovalor	% de variância	% acum.da variância
NEA	1	3.0929	44.2	44.2
PUEA	2	2.1885	31.3	75.4
q	3	1.0624	15.2	90.6
pH	4	0.4894	6.9	97.6
Cl/CO ₃ H	5	0.1667	2.4	100.0
ST	6	0.0	0.0	100.0
E	7	0.0	0.0	100.0

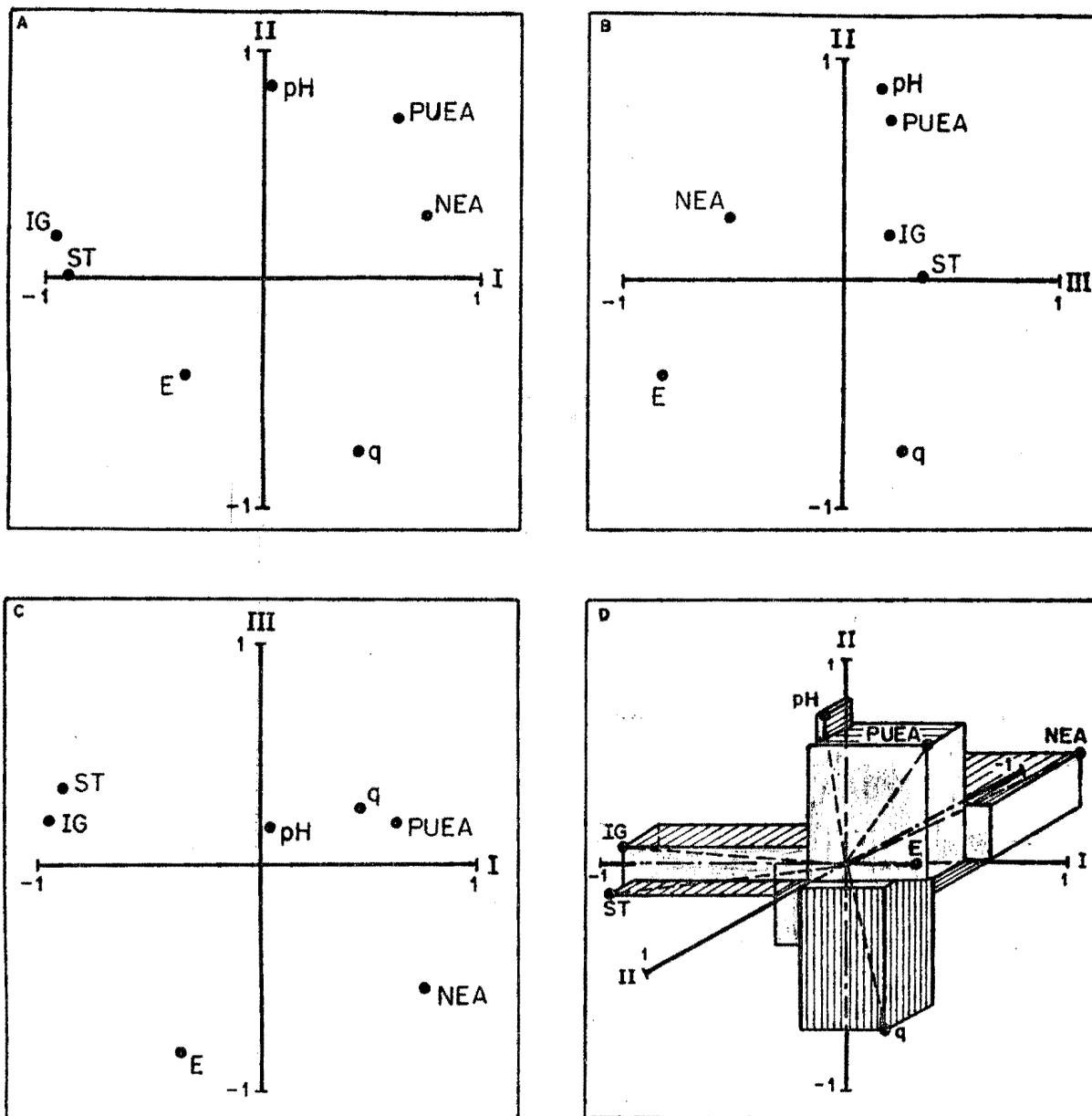
quadro c. MATRIZ DOS FATORES							
VARIÁVEIS	Não Rotada			Comunalidade final	Rotada		
	fator 1	fator 2	fator 3		fator 1	fator 2	fator 3
NEA	0.8670	-0.0761	-0.4098	0.9254	0.7420	0.2886	-0.5399
PUEA	0.7275	0.6209	0.0788	0.9210	0.6121	0.7114	0.2006
q	0.1970	-0.6497	0.6120	0.8355	0.4440	-0.7542	0.2637
pH	0.2198	0.8332	-0.1382	0.7616	0.0390	0.1910	0.1703
Cl/CO ₃ H	-0.8951	0.4106	-0.1132	0.9826	-0.9510	0.1910	0.2045
ST	-0.9114	0.2982	0.1124	0.8923	-0.8933	0.0060	0.3665
E	-0.3050	-0.6507	-0.6849	0.9855	-0.3503	-0.4208	-0.8281
AUTOVALOR	3.093	2.189	1.062				
% VARIANÇ A	38.8	34.5	16.7				
% ACUMULA-DA DA VARIANÇ A	48.8	83.3	100.0				

tais e os valores da razão cloretos/bicarbonatos serem baixos. Este mesmo tipo de correlação ocorre entre a espessura do elúvio e a profundidade da última entrada d'água ($R = -0.69$).

Os maiores autovalores (Tab. 4.4-b) indicam que três variáveis determinam 90% da variabilidade do sistema: número de entradas de água, profundidade da última entrada e descarga específica. Observa-se também que os últimos três fatores contêm menos de 3% da variância total do grupo; isto se deve ao tamanho reduzido da amostra.

As altas comunalidades finais indicam que quase toda a variabilidade total de cada variável é explicada pelos três fatores retidos (Tab. 4.4-c), exceção feita à variável pH, cuja comunalidade final atingiu somente 0.76. A matriz de fatores rotada mostra que as maiores cargas no fator um são as das variáveis geológicas (número de entradas d'água e profundidade da última entrada) e as das variáveis fisicoquímicas (relação cloretos/bicarbonatos e sólidos totais), sendo a relação entre estes dois tipos de variáveis inversa neste fator. O fator dois combina a profundidade da última entrada d'água, a descarga específica e o pH, sendo que somente a variável hidrodinâmica apresentou carga negativa. O fator três é fortemente relacionado com a variável espessura do elúvio. Observa-se a associação da relação cloretos/bicarbonatos com sólidos totais (Fig. 4.5), o mesmo ocorrendo com as variáveis pH e profundidade da última entrada de água.

O grupo III apresenta o maior valor médio de descarga específica de todos os grupos (Tab. 4.1), apesar de que, neste grupo, esta variável apresenta um alto índice de variação ($C = 88\%$). Neste grupo também encontra-se o maior valor médio da relação cloretos/bicarbonatos, o que pode indicar um pequeno aporte de bicarbonatos às águas que alimentam os poços desse grupo, ou mesmo serem águas que, dado ao fator tempo, permitiram a reação do bicarbonato com os outros ions dissolvidos,



LEGENDA	
PONTOS	EIXOS
NEA - NÚMERO DE ENTRADAS DE ÁGUA	EIXO I - FATOR 1
PUEA - PROFUNDIDADE DA ÚLTIMA ENTRADA DE ÁGUA	EIXO II - FATOR 2
q - DESCARGA ESPECÍFICA	EIXO III - FATOR 3
pH - POTÊNICAL DE HIDROGÊNIO	
IG - INDICADOR GEOQUÍMICO (Cl ⁻ /CO ₃ H)	
ST - SÓLIDOS TOTAIS	
E - ESPESSURA DO ELÚVIO	

FIGURA 4.5 - GRÁFICOS DOS FATORES PRINCIPAIS DA ANÁLISE FATORIAL DO GRUPO III

precipitando carbonato de cálcio, diminuindo assim os teores de bicarbonatos em solução.

4.6.4. Grupo IV

Este grupo é o segundo em tamanho de amostra, reunindo 22 poços agrupados a um nível de similaridade de 0.28 (maior coeficiente de distância). Os poços apresentam-se bem dispersos pela área da pesquisa, não denotando claramente uma zona de concentração específica.

Pela matriz dos coeficientes de correlação (Tab.4.5-a) observa-se que as variáveis sólidos totais e relação cloretos/bicarbonatos novamente apresentaram um alto coeficiente de correlação, indicando que neste grupo também estas variáveis um comportamento de ocorrência semelhante. Os autovalores (Tab. 4.5-b) indicam que as quatro primeiras variáveis (NEA, PUEA, q e pH) determinam mais de 90% da variabilidade total do sistema.

Pelas comunalidades finais (Tab. 4.5-c), verifica-se que todas as variáveis têm, individualmente, mais de 75% de suas variâncias contidas nos três fatores retidos, sendo as maiores comunalidades referentes às variáveis hidrofisicoquímicas (pH, Cl/CO₃H, ST).

A matriz de fatores rotada (Tab. 4.5-c) mostra que as maiores cargas sobre o fator um correspondem às variáveis número de entradas de água e pH, ambas com carga positiva. A variável profundidade da última entrada d'água também apresenta carga positiva significativa no fator um, mostrando variabilidade semelhante às duas variáveis supracitadas neste fator. No fator dois, relacionam-se fortemente as variáveis profundidade da última entrada d'água e espessura do elúvio, fazendo com que o fator dois seja caracterizado como um fator

Tabela 4.5 - Matriz de correlação, estatística da matriz de correlação e estatísticas das matrizes de fatores não rotada e rotada do grupo IV.

quadro a. MATRIZ DE CORRELAÇÃO							
VARIÁVEIS	NEA	PUEA	q	pH	Cl/CO ₃ H	ST	E
NEA	1						
PUEA	0.4720	1					
q	0.2929	-0.1538	1				
pH	0.3584	-0.0333	0.1905	1			
Cl/CO ₃ H	0.5633	0.4575	0.3918	-0.1267	1		
ST	0.4048	0.4488	0.4300	-0.1507	0.8303	1	
E	0.2054	0.6746	-0.2314	-0.0013	0.4459	0.3867	1

quadro b. ESTATÍSTICAS				
VARIÁVEIS	Fator	Autovalor	% de variância	% acum. da variância
NEA	1	3.0465	43.5	43.5
PUEA	2	1.5836	22.6	66.1
q	3	1.2272	17.5	83.6
pH	4	0.5159	7.4	91.0
Cl/CO ₃ H	5	0.3015	4.3	95.5
ST	6	0.2204	3.1	98.5
E	7	0.1447	1.5	100.0

quadro c. MATRIZ DOS FATORES							
VARIÁVEIS	Não Rotada			Comunalidade final	Rotada		
	fator 1	fator 2	fator 3		fator 1	fator 2	fator 3
NEA	0.6971	-0.3011	-0.4290	0.7509	0.7509	0.4210	0.1403
PUEA	0.7301	0.4791	-0.2357	0.8182	0.1191	0.8967	-0.0071
q	0.3257	-0.8364	0.2160	0.8522	0.5630	-0.3080	0.6637
pH	0.0221	-0.4233	-0.8426	0.8897	0.8141	-0.0985	-0.4661
Cl/CO ₃ H	0.8973	-0.1276	0.2572	0.8876	0.2921	0.5616	0.6978
ST	0.8479	-0.1370	0.3608	0.8678	0.2144	0.4999	-0.0642
E	0.6299	0.5914	-0.1860	0.7811	-0.0280	0.8810	-0.0642
AUTOVALOR	3.046	1.584	1.227				
% VARIANÇA	52.0	27.0	20.9				
% ACUMULADA DA VARIANÇA	52.0	79.0	100.0				

predominantemente geológico. O fator três combina as variáveis físicoquímicas sólidos totais e relação cloretos/bicarbonatos, com a variável hidrodinâmica descarga específica, sendo que esta última variável apresenta ainda carga significativa no fator um, sugerindo também sua correlação com o número de entradas de água e o pH, o mesmo ocorrendo com as variáveis sólidos totais e a relação cloretos/bicarbonatos em relação à profundidade da última entrada d'água e a espessura do elúvio no fator dois.

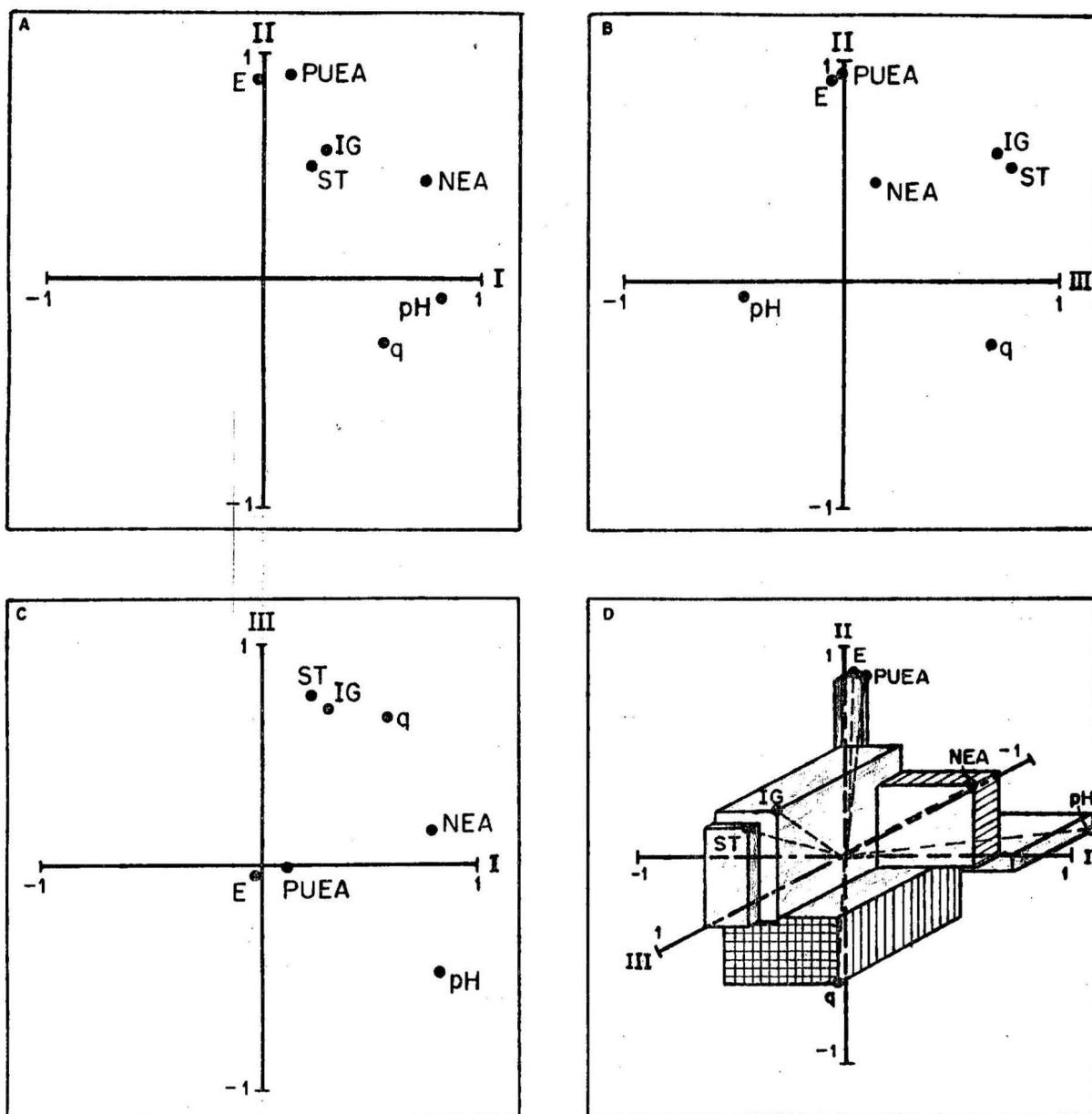
A disposição das variáveis em relação aos três fatores principais (Fig. 4.6) evidencia a semelhança da variabilidade das variáveis sólidos totais e relação cloretos/bicarbonatos e, de maneira menos acentuada das variáveis profundidade da última entrada d'água e espessura do elúvio. Pode-se observar ainda a variabilidade bastante distinta das variáveis descarga específica e espessura do manto de alteração (elúvio).

Os valores médios das variáveis deste grupo (Tab.4.1), apresentam valores intermediários em relação aos outros grupos, destacando-se somente valores individuais, pois neste grupo encontra-se o poço com a menor descarga específica e menor pH, assim como o poço com o menor teor de sólidos totais analisado e a maior razão de cloretos por bicarbonatos.

4.6.5. Grupo V

Foi o menor grupo detectado pela análise de agrupamento. É constituído por cinco poços somente e apresenta coeficiente de similaridade máximo igual a 0.23 (Fig. 4.1). Observa-se que os poços estão todos localizados na porção oriental da área de pesquisa (Fig. 4.2).

Aqui, como no grupo III, o número de amostras é menor que o número de variáveis estudadas, o que faz com que haja fatores sem interferência na variância total do grupo (Tab. 4.6-b): os três últimos fatores apresentam autovalores menores que 10^{-4} .



LEGENDA	
PONTOS	EIXOS
NEA - NÚMERO DE ENTRADAS DE ÁGUA	EIXO I - FATOR 1
PUEA - PROFUNDIDADE DA ÚLTIMA ENTRADA DE ÁGUA	EIXO II - FATOR 2
q - DESCARGA ESPECÍFICA	EIXO III - FATOR 3
pH - POTÊNCIAL DE HIDROGÊNIO	
IG - INDICADOR GEOQUÍMICO (Cl/CO_3H)	
ST - SÓLIDOS TOTAIS	
E - ESPESSURA DO ELÚVIO	

FIGURA 4.6 - GRÁFICOS DOS FATORES PRINCIPAIS DA ANÁLISE FATORIAL DO GRUPO IV

Pela análise da matriz dos coeficientes de correlação (Tab. 4.6.a) percebe-se que o comportamento entre algumas variáveis é distinto do observado na maioria dos outros grupos. Chama a atenção, primeiramente, a baixa correlação existente entre as variáveis sólidos totais e razão cloretos/bicarbonatos ($R = 0.33$), caso semelhante só observado no grupo I. Interessante também notar a boa correlação existente entre o número de entradas de água e a descarga específica ($R = 0.85$), assim como a total independência entre a espessura do elúvio e o número de entradas de água. Apresentam ainda correlações significativas: número de entradas de água e a razão cloretos/bicarbonatos ($R = 0.62$), profundidade da última entrada de água e a descarga específica ($R = -0.67$), pH e sólidos totais ($R = -0.60$) e sólidos totais com a espessura do elúvio ($R = -0.61$).

Os autovalores (Tab.4.6.b) indicam que quatro variáveis determinam a totalidade da variabilidade do sistema. São elas: número de entradas de água, profundidade da última entrada, descarga específica e pH.

Somente a variável espessura do elúvio apresentou uma comunalidade baixa, comparativamente às obtidas pelas outras variáveis (Tab.4.6.c). Analisando-se a matriz de fatores rotada (Tab.4.6.c) verifica-se que a maior carga no fator um é a da variável hidrodinâmica (q), sendo que as variáveis geológicas número de entradas e profundidade da última entrada d'água também se relacionam neste fator, mas com cargas de sinais contrários. O fator dois é fortemente relacionado com as variáveis fisicoquímicas pH e sólidos totais. A descarga específica e o número de entradas de água também apresentam cargas neste fator, mostrando haver uma variabilidade semelhante a da variável pH no fator dois, pois apresentam cargas com mesmo sinal. Sobre o fator três predominam as cargas das variáveis razão cloretos/bicarbonatos e espessura do elúvio e, secundariamente, da profundidade da

Tabela 4.6 - Matriz de correlação, estatísticas da matriz de correlação e estatísticas das matrizes de fatores não rotada e rotada do grupo V.

quadro a. MATRIZ DE CORRELAÇÃO							
VARIÁVEIS	NEA	PUEA	q	pH	Cl/CO ₃ H	ST	E
NEA	1						
PUEA	-0.2050	1					
q	0.8525	-0.6747	1				
pH	0.4456	0.2274	0.2718	1			
Cl/CO ₃ H	0.6240	0.4549	0.2128	0.0847	1		
ST	-0.2552	0.1485	-0.2481	-0.6061	0.3363	1	
E	0.0001	-0.4413	0.1454	-0.2440	-0.3920	-0.6183	1

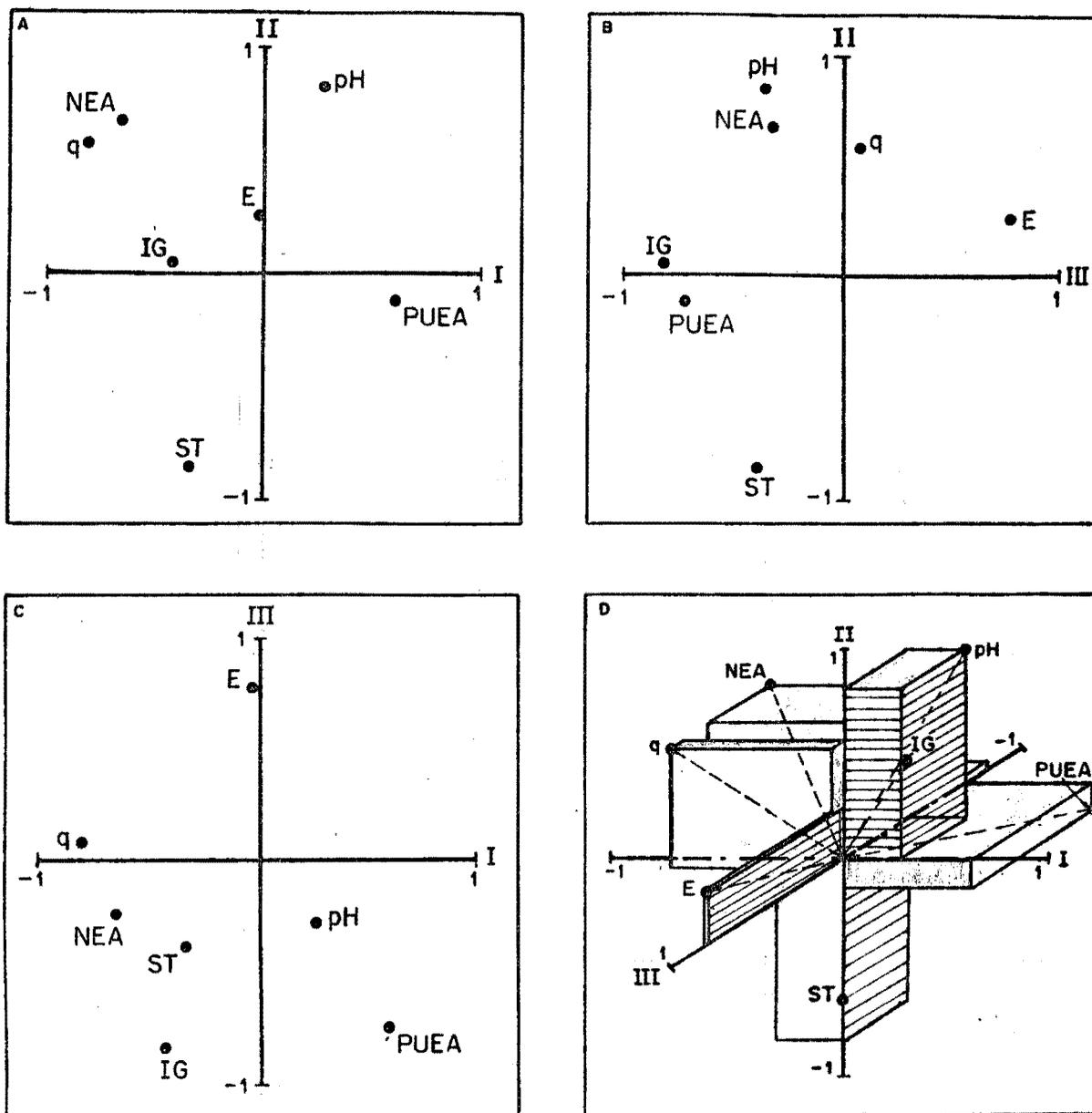
quadro b. ESTATÍSTICAS				
VARIÁVEIS	Fator	Autovalor	% da variância	% acum. da variância
NEA	1	2.6004	37.1	37.1
PUEA	2	2.1956	31.4	68.5
q	3	1.4599	20.9	89.4
pH	4	0.7441	10.6	100.0
Cl/CO ₃ H	5	0.0000	0.0	100.0
ST	6	0.0000	0.0	100.0
E	7	0.0000	0.0	100.0

quadro c. MATRIZ DOS FATORES							
VARIÁVEIS	Não Rotada			Comunalidade final	Rotada		
	fator 1	fator 2	fator 3		fator 1	fator 2	fator 3
NEA	0.8177	0.5389	0.1457	0.9202	-0.6494	0.6678	-0.3354
PUEA	-0.5616	0.5425	-0.5494	0.9114	0.6158	-0.1314	-0.7176
q	0.8997	0.1549	0.3779	0.9762	-0.7976	0.5768	0.0863
pH	0.4864	0.3689	-0.7226	0.8948	0.2814	0.8276	-0.3614
Cl/CO ₃ H	0.0738	0.8839	0.1958	0.8250	-0.4013	0.0476	-0.8135
ST	-0.6413	0.3622	0.6581	0.9755	-0.3165	-0.8516	-0.3875
E	0.3921	-0.7338	-0.0219	0.6927	-0.0094	0.2695	0.7874
AUTOVALOR	2.601	2.196	1.460				
% VARIANÇA	41.6	35.1	23.3				
% ACUMULADA DA VARIANÇA	41.6	76.7	100.0				

última entrada de água; esta última com mesmo sinal da variável físicoquímica.

Percebe-se que a variável profundidade da última entrada de água apresentou sempre cargas fatoriais com sinais contrários às das variáveis descarga específica e espessura do elúvio (Fig.4.7), o que sugere uma variabilidade distinta da primeira variável (PUEA) em relação as duas últimas (q e E). Nota-se também a alta correlação e a variabilidade semelhante das variáveis: descarga específica e número de entradas de água.

O grupo V apresentou alguns valores característicos das variáveis que se salientaram na amostragem total. É o caso do valor médio da espessura do elúvio que, comparado aos outros grupos, é muito superior (Tab.4.1). As variáveis físicoquímicas pH e sólidos totais apresentaram, neste grupo, os menores valores médios.



LEGENDA	
PONTOS	EIXOS
NEA - NÚMERO DE ENTRADAS DE ÁGUA	EIXO I - FATOR 1
PUEA - PROFUNDIDADE DA ÚLTIMA ENTRADA DE ÁGUA	EIXO II - FATOR 2
q - DESCARGA ESPECÍFICA	EIXO III - FATOR 3
pH - POTÊNICAL DE HIDROGÊNIO	
IG - INDICADOR GEOQUÍMICO (Ca/CO ₃ H)	
ST - SÓLIDOS TOTAIS	
E - ESPESSURA DO ELÚVIO	

FIGURA 4.7 - GRÁFICOS DOS FATORES PRINCIPAIS DA ANÁLISE FATORIAL DO GRUPO V

CAPÍTULO 5

INTEGRAÇÃO DOS RESULTADOS

5.1. GENERALIDADES

Pela análise de tendência da distribuição espacial e orientação dos alinhamentos obteve-se o zoneamento dessas características estruturais na área pesquisada. No estudo dos dados hidrogeológicos, realizado com o auxílio das análises de agrupamento e de fatores, foi possível compartimentar a região em função da similaridade dos parâmetros selecionados, além de estudar o comportamento e a interação desses parâmetros dentro dos respectivos grupos propostos.

Parte-se agora para a conjunção das informações obtidas e a conseqüente síntese das características estruturais e hidrogeológicas do aquífero fraturado na região da pesquisa. Introduce-se aqui informações adicionais das características físico-químicas das águas subterrâneas da área. Para uma exposição esquemática tomou-se como base as áreas ocupadas pelos grupos estabelecidos na análise de agrupamento.

5.2. ÁREAS OCUPADAS PELO GRUPO I

Abrange basicamente o flanco oeste e parte da borda norte (porção ocidental) da região, além de pequenas porções isoladas a nordeste, a sudeste e a sul. As duas áreas principais (flanco oeste e borda norte), onde se concentram aproximadamente 80% dos poços do grupo I, mais a área localizada a sudeste, caracterizaram-se por possuir baixa densidade de fraturas, o que as tornam desfavoráveis do ponto de

hidrogeológico. Outro fator que reforça este parecer negativo da potencialidade hidrogeológica dessas áreas é o aspecto morfológico. Basicamente todo flanco oeste e norte da região pesquisada apresenta relevo fortemente acidentado, com diferenças de altitudes acentuadas. Em termos de orientação das fraturas, tem-se que, no flanco oeste, predominam os alinhamentos com orientação noroeste a noroeste, e os de orientação nordeste a sudoeste. Na porção ocidental da borda norte existe um equilíbrio na ocorrência de ambos os sistemas de fraturas, sempre com tendência a apresentarem os seus menores azimutes.

Pela análise fatorial dos dados hidrogeológicos (de poços) do grupo I, verificou-se que os poços desse grupo foram agrupados principalmente devido a semelhança no valor das variáveis geológicas (espessura do elúvio - fator um; profundidade da última entrada de água - fator dois) e, secundariamente, hidrofísicoquímicas (ph e sólidos totais, ambas no fator três). No relacionamento entre as variáveis, somente o pH e o teor de sólidos totais apresentaram variabilidade semelhante. Não foram observadas correlações significativas entre as variáveis analisadas neste grupo.

Os poços do grupo I caracterizaram-se por apresentar não mais que três entradas de água, estando a média da profundidade da última entrada em torno dos 50m, o que caracteriza tais poços como pouco profundos. As vazões são bastante variadas, apresentando valores que vão de um mínimo de $3 \text{ m}^3/\text{h}$ até um máximo de $19 \text{ m}^3/\text{h}$. A descarga específica também é variada, não sendo possível observar nas áreas em questão uma disposição preferencial de poços que apresentassem maior ou menor rendimento.

A espessura do manto de alteração (elúvio) observada nos perfis dos poços desse grupo não apresentou valores superiores a 9m, o que leva a crer ser baixa a potencialida

de de recarga por parte do aquífero (elúvio) sobreposto ao aquífero fraturado.

Pelas características físico-químicas das águas subterrâneas nestas áreas (Tab.5.1) percebe-se que, em geral, as águas são de boa qualidade. Os elementos químicos que se sobressaem por apresentarem os maiores teores médios de toda a região são o cálcio e o magnésio, sendo que somente este último apresentou, em dois poços (ambos no município de São Paulo das Missões), teores acima do máximo tolerável para o consumo humano (15 mg/l). São tipicamente águas bicarbonatadas ($r_{HCO_3} > r_{Cl} > r_{SO_4}$ e $Ca > Na > Mg$), o que reflete boas condições de fluxo, fato este reforçado pelos baixos teores de sódio e potássio acusados nas análises.

Tabela 5.1 - Características físico-químicas das águas subterrâneas no grupo I.

	Na + K mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Cl mg/l	SO ₄ mg/l	HCO ₃ mg/l	F Mg/l	Alcal.T. CaCO ₃	Resíduo seco	pH
\bar{X}	29.6	20.3	8.0	3.9	5.9	148.7	0.3	122.0	222.6	7.6
s	25.3	11.0	9.3	1.7	7.7	54.9	0.2	48.7	68.4	0.5
mín.	2.5	1.2	0.7	1.3	0.2	31.7	0.0	26.0	105.5	6.4
máx.	100.7	46.1	17.0	6.9	18.7	292.8	0.7	237.0	378.7	8.7

5.3. ÁREAS OCUPADAS PELO GRUPO II

Esquemáticamente, os poços que constituem o grupo II ocupam uma estreita faixa descontínua, de sentido noroeste-sudeste, na porção ocidental da região pesquisada, disposição esta coincidente com a feição morfológica transicional de platô superior com dissecação primária, a leste, para um relevo fortemente acidentado a oeste.

A densidade das fraturas nas áreas contidas nesta faixa tendem a aumentar para sudeste, atingindo valores elevados nos municípios de Giruá e Guarani das Missões. Ressalte-se que esta mesma porção da faixa (sudeste) revelou valores observados menores que os gerados pela tendência, enquanto que na porção central da faixa ocorreu o inverso (valores observados da densidade de fraturamento são maiores que os gerados pela tendência), mostrando que a densidade das fraturas decresce do centro para as extremidades da faixa. As fraturas com orientação noroeste predominam nas extremidades da faixa, apresentando azimutes com valores iguais ou inferiores (extremo noroeste) a 140° . As fraturas com orientação nordeste, predominantes na zona de maior densidade de fraturamento dessa faixa, apresentam aí uma constância no valor dos azimutes, em torno de 35° , decrescendo a noroeste.

A análise fatorial mostrou que no grupo II também atuaram preferencialmente fatores de natureza geológica (número de entradas de água - fator um; espessura do manto de alteração - fator dois; profundidade da última entrada de água - fator três) e secundariamente fatores químicos (razão cloretos/bicarbonatos e sólidos totais, ambas no fator dois) e hidrodinâmico (descarga específica - fator um). O teor de sólidos totais apresentou alta correlação e variabilidade semelhante a da razão cloretos/bicarbonatos, o que pode ser indicativo de fontes comuns ou semelhantes das águas nesta faixa. Outro ponto observado foi a baixa correlação e variabilidade diferente entre o número de entradas de água e a profundidade da última entrada, o que mostra uma certa independência na ocorrência de uma em relação à outra.

Os poços nesta área se caracterizaram por apresentar a profundidade da última entrada de água nunca inferior a 100m, chegando a apresentar um poço com profundidade superior a 200m. Mesmo sendo poços profundos, não apresentaram mais que três entradas d'água. A vazão é bastante variada

nestes poços, com valor mínimo de $2 \text{ m}^3/\text{h}$ até um máximo de $20 \text{ m}^3/\text{h}$. A razão vazão/rebaixamento (q) apresentou valores bastante baixos, com média em torno de $0.3 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$, o que de nota o baixo rendimento desses poços. O manto de alteração, de forma semelhante ao observado no grupo I, mostrou-se pouco espesso, não ultrapassando a 12m de espessura.

Quimicamente as águas dos poços que ocorrem na área em questão (Tab.5.2) caracterizam-se por apresentar teores elevados de bicarbonatos, com média de $220 \text{ mg}/\text{l}$, o que refletiu também nos altos valores da alcalinidade total. O teor de sólidos totais também apresentou valores elevados, inclusive com teor superior ao máximo permissível segundo o padrão de potabilidade da Organização Mundial de Saúde. Já os elementos cálcio e magnésio apresentaram os teores médios mais baixos observados nos grupos. São as águas mais alcalinas de toda a região, revelando um pH médio de 9.2. Quatro das oito amostras analisadas foram classificadas como não potáveis dado aos elevados teores de alguns elementos na água.

Tabela 5.2 - Características físico-químicas das águas subterrâneas no grupo II

	Na + K mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Cl mg/l	SO ₄ mg/l	HCO ₃ mg/l	F mg/l	Alcal.T. CaCO ₃	Resíduo seco	pH
\bar{X}	112.8	7.3	3.1	5.8	6.9	220.3	1.0	254.8	382.1	9.2
s	41.2	12.8	5.8	2.3	5.3	101.4	0.5	79.1	98.0	0.7
mín.	64.3	0.4	0.0	3.0	1.1	134.2	0.3	155.0	236.1	8.2
máx.	170.1	38.5	17.3	10.0	19.0	452.3	1.5	382.0	527.5	10.0

Os altos teores de alguns elementos químicos, tais como sódio e potássio, provenientes possivelmente da dissolução dos minerais de feldspatos e piroxênios existentes na

rocha, parecem indicar que as fraturas por onde percolaram as águas encontravam-se bastante atingidas pelo intemperismo químico. Os teores elevados de bicarbonatos, por sua vez, sugere que a circulação das águas neste meio se dê de maneira rápida, não permitindo a reação desse elemento com outros conteúdos na água. Considerando ainda a configuração geomorfológica da área em questão (platô dissecado transicional) e a profundidade dos poços aí presentes, infere-se ter nesta faixa uma zona de águas mistas; onde a recarga ocorre de maneira rápida (alto gradiente hidráulico e/ou pequena espessura do manto de alteração), havendo uma troca ativa d'água superficial com águas mais profundas e antigas.

5.4. ÁREAS OCUPADAS PELO GRUPO III

O grupo III, constituído por um número pequeno de amostras (6 poços), apresenta-se distribuído próximo à área central da região pesquisada (Fig. 4.2). É interessante notar que a distribuição dos poços desse grupo segue as isolinhas de densidade de fraturamento médio do mapa de tendência cúbica da distribuição das fraturas (Fig. 3.3). Apesar da uniformidade da densidade de fraturamento estas áreas apresentam morfologia variada, com relevo tipo platô com dissecamento primário, a leste, até relevos acidentados e topograficamente mais baixos, a oeste e a sul.

As áreas a leste ocupadas por poços desse grupo apresentam uma pequena predominância de ocorrência das fraturas de orientação nordeste sobre as de orientação noroeste. As primeiras apresentam azimutes médios em torno de $34^{\circ} \pm 2^{\circ}$ e condicionam predominantemente os tributários de 1.^a e 2.^a ordens dos rios Santa Rosa e Santo Cristo. As fraturas NW. aí presentes apresentam azimutes superiores a 140° , com tendência crescente a sudoeste. Nas áreas ocupadas a oeste continua a predominar as fraturas nordeste com padrão semelhante ao observado

anteriormente, enquanto que as fraturas noroeste tendem a apresentar azimutes inferiores a 140° , refletindo possivelmente as orientações regionais dos rios Amandau, Comandaí e Ijuí.

Pela análise fatorial verificou-se que os principais fatores que condicionam o grupo III são de natureza físico-química (razão cloretos/bicarbonatos e sólidos totais - fator um; pH no fator dois) e, secundariamente, geológico (espessura do elúvio no fator três). A razão de cloretos por bicarbonatos e o teor de sólidos totais, além de apresentarem ótima correlação entre si, correlacionam-se com o número de entradas de água nos poços, de forma inversa (maior o número de entradas, menor os valores da relação Cl/CO_3H e menores os teores de sólidos totais, e vice-versa). Não foi possível verificar se esta relação está ligada a profundidade das entradas d'água.

Os poços que compõem o grupo III apresentam em média três entradas de água, mas podendo atingir até cinco, estando a profundidade média da última entrada em torno dos 60m. A vazão varia de $3 \text{ m}^3/\text{h}$ a $37 \text{ m}^3/\text{h}$. A razão vazão/rebaixamento, também com um largo intervalo de valores, apresentou o maior valor médio ($2 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$), indicando ser este grupo composto por poços com bons rendimentos.

Quimicamente, as águas subterrâneas nestas áreas apresentam, em relação as outras áreas, valores intermediários dos teores dos elementos químicos analisados (Tab.5.3). Salientou-se somente o alto teor médio de cloretos, além dos teores elevados de cálcio e magnésio registrados em um único poço, localizado no município de Cândido Godói. São tipicamente águas bicarbonatadas e, excetuando o poço em Cândido Godói, são consideradas de boa qualidade para o consumo humano.

Tabela 5.3 - Características físico-químicas das águas subterrâneas no grupo III.

	Na + K mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Cl mg/l	SO ₄ mg/l	HCO ₃ mg/l	F mg/l	Alcal.T CaCO ₃	Resíduo seco	pH
\bar{X}	40.0	17.6	5.6	11.8	4.1	136.6	0.3	134.0	187.7	8.0
s	30.3	18.8	7.5	5.4	3.0	45.6	0.0	41.4	77.5	1.0
mín.	14.4	0.7	1.2	2.0	0.7	93.9	0.3	77.0	102.8	7.0
máx.	81.3	52,5	18.8	18.0	8.2	225.7	0.3	185.0	312.7	9.7

5.5. ÁREAS OCUPADAS PELO GRUPO IV

Não há uma área de ocorrência bem definida para o grupo IV, pois os poços que o constituem encontram-se dispersos por toda a região da pesquisa, apesar de que mais de 60% dos poços apresentam-se dispostos segundo uma faixa, de sentido sudoeste-nordeste, que atravessa toda a porção ocidental e parte da porção oriental da região. Esta faixa acompanha as isolinhas de tendência vetorial indicativa de haver uma predominância de ocorrência das fraturas com orientação nordeste, sendo que estas apresentam azimutes iguais ou inferiores a $36^\circ \pm 2^\circ$, com tendência a diminuir em direção nordeste. Já as fraturas noroeste tendem a apresentar azimutes com valores inferiores a 140° . Nas outras áreas onde ocorrem poços desse grupo, mais a leste, as fraturas nordeste mantêm a tendência de apresentarem azimutes inferiores a 36° , enquanto as fraturas noroeste tendem a apresentar azimutes com valores superiores a 140° .

Com o auxílio do mapa de tendência cúbica da distribuição espacial das fraturas, verificou-se que aproximadamente

70% dos poços do grupo IV encontram-se em áreas com baixas densidades de fraturas por área. A grande maioria dos poços desse grupo estão em áreas cujo relevo é fortemente acidentado, mas existem poços com área de platô, zona esta mais plana.

A análise fatorial do grupo IV mostrou que os principais fatores que caracterizam os poços desse grupo são os fatores de natureza físicoquímica (pH - fator um; sólidos totais e razão cloretos/bicarbonatos - fator três). O fator dois caracterizou-se por ser de natureza essencialmente geológica, relacionando as variáveis espessura do elúvio e a profundidade da última entrada d'água. O parâmetro hidrodinâmico descarga específica mostrou-se estar relacionado com as variáveis físicoquímicas das águas subterrâneas nestas áreas, pois também mostrou cargas fatoriais significativas, nos fatores um e três. Não encontrou-se uma explicação satisfatória para este fato.

Os poços do grupo IV mostram-se normalmente com três entradas de água, podendo atingir até seis entradas, sendo a profundidade da última entrada bastante variada; de um mínimo de 22m até um máximo de 165m. A vazão também apresenta uma grande variação, mostrando valores extremos de $1,6 \text{ m}^3/\text{h}$ e $30 \text{ m}^3/\text{h}$. A descarga específica também varia bastante, sendo que neste grupo foi observado o poço com o menor rendimento, localizado no município de Santo Cristo. O manto de alteração apresentou espessuras que variam de 3 m a 18 m.

As amostras d'água subterrânea desse grupo apresentaram, em relação aos outros grupos, valores médios intermediários dos teores dos elementos analisados (Tab. 5.4), sobressaindo somente os baixos teores de cloretos, bicarbonatos, sódio e potássio. São águas tipicamente bicarbonatadas e de boa qualidade para o consumo humano.

Tabela 5.4 - Características físico-químicas das águas subterrâneas no grupo IV.

	Na + K mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Cl mg/l	SO ₄ mg/l	HCO ₃ mg/l	F mg/l	Alcal.T CaCO ₃	Resíduo seco	pH
\bar{X}	17.3	15.9	5.3	3.7	2.7	98.7	0.3	81.1	154.2	7.2
s	17.6	9.5	3.6	2.1	3.1	37.7	0.2	38.3	45.9	0.8
mín.	1.4	1.2	1.0	1.0	0.2	29.0	0.0	24.0	66.8	6.2
máx.	68.1	36.5	14.1	11.0	15.3	190.0	0.6	161.0	242.0	9.2

5.6. ÁREAS OCUPADAS PELO GRUPO V

Constituem-se em apenas duas áreas, ambas na porção oriental da região, atestadas hidrologicamente por somente cinco poços. Uma das áreas está localizada próxima à porção central, nitidamente uma zona de platô elevado com dissecação primária, enquanto a outra área encontra-se numa zona também de platô, mas alternando-se com áreas bastante acidentadas, a nordeste. Ambas as áreas estão situadas em zonas cuja tendência é de apresentarem de média a elevada densidade de fraturas por área, apesar de que as duas áreas também apresentam zonas anômalas (resíduo negativo) à tendência regional da distribuição das fraturas.

Nas duas áreas em questão foi observado uma tendência regional de predominarem fraturas de orientação nordeste, orientações estas concordantes com as das drenagens secundárias, sendo também detectadas zonas anômalas nestas áreas. As fraturas nordeste apresentam-se, na área mais central, com azimutes próximos a 30°, chegando a atingir valores superiores a 45° na área mais a nordeste. Já as fraturas de orientação noroeste apresentam um comportamento contrário, pois os vetores médios que caracterizam estas fratu

ras tendem a apresentar, na porção central, azimutes com valor superior a 140° , decrescendo acentuadamente na porção nordeste.

Como já mencionado na análise fatorial, o pequeno número de poços desse grupo, à semelhança do grupo III, confere pouca fiabilidade aos resultados obtidos pela análise fatorial sendo, portanto, que as conclusões com base neste tipo de análise são aqui expostas no intuito de ter-se somente uma primeira aproximação do comportamento das variáveis estudadas neste grupo. Pode-se, então, inferir que o grupo caracteriza-se principalmente devido a fatores de natureza fisicoquímica (teor de sólidos totais e pH - fator dois; e razão cloretos/bicarbonatos - fator três) e de natureza hidrodinâmica (descarga específica - fator dois). Este grupo foi o que mostrou a melhor correlação entre o número de entradas de água e a descarga específica (correlação positiva), assim como entre a descarga específica e a profundidade da última entrada d'água (correlação negativa). Estas correlações são justificáveis, pois é notório a influência direta do número de entradas d'água na vazão do poço, como também a influência negativa da profundidade da última entrada d'água sobre a descarga específica, ou seja, quanto mais profunda for a entrada de água, menor será o espaçamento das paredes da fratura (maior pressão litostática), aumentando a influência da rugosidade relativa, fazendo com que haja a passagem de um regime de escoamento hidraulicamente liso para um escoamento hidraulicamente rugoso a velocidades de escoamento mais baixas e, conseqüentemente, provocando maiores perdas de carga, o que refletiria em menor descarga específica.

Os poços do grupo V caracterizam-se por apresentar, em média, três entradas de água, sendo que a profundidade da última entrada, a semelhança com o grupo I, não ultrapassa os cem metros. A vazão varia de $3 \text{ m}^3/\text{h}$ a $8 \text{ m}^3/\text{h}$ e a descarga específica não ultrapassa a $1,4 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$. O que chama a

atenção neste grupo são as grandes espessuras do manto de alteração (elúvio), que variam de 24m a 36m, o que pode, em relação ao aquífero fraturado sotoposto, refletir-se em aspecto positivo (volume de água considerável repassado lentamente mas continuamente ao longo do tempo) ou negativo (maior quantidade de água retida pelos horizontes argilosos do solo).

Quimicamente, as amostras da água subterrânea nestas áreas apresentaram valores baixos para os teores médios dos elementos analisados, principalmente dos bicarbonatos, alcalinos, sulfetos, além do resíduo seco e da alcalinidade também apresentarem valores médios baixos em relação ao observado nos outros grupos (Tab.5.5). Apesar do tamanho da amostra ser pequeno, pode-se fazer algumas inferências a respeito das características químicas apresentadas por este grupo. Os baixos teores de bicarbonatos podem indicar uma baixa velocidade de fluxo, o que, associando à espessura do elúvio, pode ser um indício que o manto de alteração seja uma das principais fontes de recarga, liberando lentamente as águas das chuvas para as fraturas, sendo possível inclusive que outros elementos sejam retidos ou precipitados durante a percolação das águas no manto de alteração. Outro motivo que pode ser aventado para justificar os baixos teores de alguns elementos químicos, tais como o sódio, potássio, cálcio e magnésio, é a profundidade da última entrada d'água que, não sendo superior a cem metros, pode não estar captando águas da circulação regional, águas estas mais antigas e possivelmente mais ricas em substâncias dissolvidas.

Tabela 5.5 - Características físico-químicas das águas subterrâneas no grupo V.

	Na + K mg/l	Ca mg/l	Mg mg/l	Cl mg/l	SO ₄ mg/l	HCO ₃ mg/l	F mg/l	Alcal.T. CaCO ₃	Resíduo seco	pH
\bar{X}	9.2	10.4	3.7	3.8	1.5	66.4	0.2	54.5	99.8	7.1
s	10.1	4.6	2.0	2,4	1.3	12.5	0.2	10.2	24.2	0.5
mín.	2.4	3.6	0.2	2.0	0.1	52.5	0.0	43.0	73.0	6.6
máx.	24.1	16.0	5.1	8.0	3.4	81.7	0.5	67.0	125.0	7.9

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Foram aplicadas técnicas geomatemáticas na análise dos dados estruturais e hidrogeológicos da região noroeste do estado do Rio Grande do Sul, que, juntamente com algumas técnicas convencionais, permitiram obter resultados significativos para o conhecimento hidrogeológico da região a nível regional.

Quanto os aspectos estruturais, observou-se que:

- a distribuição espacial das fraturas é heterogênea, isto é, existem zonas com densidade de fraturamento maiores que outras, indicando que os eventos tectônicos que atuaram na região provocaram maiores deformações em algumas áreas que em outras;
- as porções centro-sul (compreendendo áreas parciais dos municípios de Giruá, Guarani das Missões, Cerro Largo e Cândido Godói) e nordeste (abrangendo os municípios de Três de Maio, Independência e Catuípe), mostraram-se como áreas de alta densidade de fraturas segundo a tendência regional da região e, com base no critério estrutural, configuram-se como as áreas mais favoráveis sob o ponto de vista hidrogeológico.
- o flanco oeste, assim como parte da porção sul-sudeste (abrangendo áreas parciais dos municípios de Giruá, Catuípe e Santo Ângelo), configuram-se, tanto pela tendência regional como pelas anomalias negativas, como áreas com as menores densidades de fraturas, o que as caracteriza, juntamente com as áreas parciais dos municípios Guarani das Missões, Santa Rosa e Tuparendi (com anomalias negativas significativas), como menos favoráveis hidrogeologicamen-

te pelo critério estrutural;

- a orientação das fraturas da região, em escala regional, apresentou uma ampla variabilidade, tanto espacial como de azimutes.

Duas orientações preferenciais (médias) de fraturamento ficaram evidenciadas: N 50±5 W e 35±5 E, ambas coincidentes com as orientações preferenciais preconizadas para o sistema regmático mundial do Arqueano:

- as fraturas noroeste são predominantemente as controladoras dos cursos d'água superficiais principais da região, exceto o rio Uruguai; são elas as que apresentam os maiores com primmentos a nível regional;
- as fraturas nordeste constituem-se, predominantemente, nas orientações preferenciais dos cursos d'água secundários. Ve rificou-se ser a ocorrência de fraturas desse quadrante o fator principal na determinação da maior ou menor densidade de fraturamento das áreas.

Quanto aos aspectos hidrogeológicos, verificou-se que:

- em função das variáveis estudadas (número de entradas de á gua, profundidade da última entrada d'água, descarga específica, pH, razão cloretos/bicarbonatos, sólidos totais e espessura do manto de alteração), foi possível obter uma compartimentação dos poços perfurados no aquífero fraturado da área. Foram cinco os grupos hierárquicos obtidos pela análise de agrupamento, sendo o nível de similaridade de cada grupo considerado muito bom;
- a distribuição espacial dos grupos propostos mostrou haver um controle, ora estrutural, ora geomorfológico, ou ambos, na ocorrência dos grupos. Somente um grupo (grupo IV) não mostrou uma relação espacial evidente com os aspectos supracitados;

- a variabilidade e a interação das variáveis nos grupos foi possível através da análise dos fatores que mais condicionaram tais agrupamentos. Dois grupos (grupos III e IV) tiveram seus resultados comprometidos pelo pequeno tamanho da amostra que os compunha;
- no conjunto, verificou-se haver influência da espessura do manto de alteração (elúvio) nos teores dos elementos químicos contidos nas águas subterrâneas da região (correlação negativa), assim como da relação existente entre a profundidade da última entrada d'água dos poços e a descarga específica (inversamente proporcional) e os valores das características físico-químicas (diretamente proporcionais).

Sobre as técnicas geomatemáticas empregadas no tratamento dos dados estruturais (Análise por Superfície de Tendência), observou-se que:

- no tratamento dos dados da distribuição espacial das fraturas mostrou-se bastante eficaz dado a boa aderência das superfícies geradas aos pontos observados, o que permitiu uma visualização clara da tendência da distribuição do fraturamento na região e a delimitação de zonas com maior ou menor grau de fraturamento;
- no tratamento das orientações de todas as fraturas mapeadas não se obteve uma aderência significativa das superfícies de tendência geradas aos pontos de controle, não permitindo uma visualização nítida do padrão geral (regional) da tendência da orientação do conjunto das fraturas da região. Isto se deveu à grande variabilidade dos azimutes (intervalo de ocorrência muito grande), o que acarretou na pouca confiabilidade dos vetores médios calculados para cada cela do mapa;
- quando do desdobramento do intervalo azimutal em dois: de 0° a 90° e de 90° a 180° , tanto os vetores médios calculados para cada cela, como a aderência das superfícies de ten

dência, apresentaram um aumento significativo na qualidade do ajuste, permitindo a inferência do comportamento das orientações das fraturas com um grau de confiabilidade plausível.

A análise de agrupamento, aplicada no tratamento das variáveis hidrogeológicas observadas nos poços, permitiu o agrupamento objetivo dos poços da região. Como o agrupamento hierárquico é convenientemente graficado na forma de um diagrama (dendrograma), é possível acompanhar os sucessivos níveis de similaridade do processo, permitindo a conveniente determinação dos grupos. A confecção de um mapa com a distribuição esquemática dos grupos assim obtidos permitiu a visualização da ocorrência espacial dos mesmos.

A análise fatorial, aplicada aos grupos detectados pela análise de agrupamento, deu subsídios para a compreensão do comportamento e interrelações das variáveis em estudo. A dimensão do número de fatores à que se desejava reduzir a dimensão do problema, deu-se sempre em função do percentual da variância contida pelos fatores originais. Dado ao número de variáveis envolvidas (sete), o número de fatores retidos nunca foi inferior a três. O emprego do sistema de rotação ortogonal VARIMAX, na maximização das cargas nos fatores retidos, mostrou-se satisfatório. A confecção de gráficos bi e tri-dimensionais permitiu a visualização, para fins de compreensão, do comportamento das variáveis, tanto nos fatores como entre si.

A operacionalidade das técnicas geomatemáticas aqui aplicadas é grande, uma vez que as mesmas acham-se decodificadas em programas para computadores de pequeno e médio porte. O tempo de processamento desses programas é pequeno e os resultados, dispostos, ora na forma de tabelas ou matrizes, ora na forma de gráficos ou mapas executados pela própria impressora do computador, facilitam a interpretação dos mesmos.

O presente trabalho é mais um passo na tentativa de quantificar os dados já existentes sobre o aquífero fraturado da formação Serra Geral, empregando para tanto a interpretação estatística para a integração de diversas variáveis. Com o aporte de novos dados e informações, os resultados aqui obtidos poderão sofrer modificações, seja nos limites do parâmetro estrutural estudados (densidade de fraturamento) ou em novos agrupamentos dos poços. As características aqui empregadas, são reflexo dos dados disponíveis ou elaborados especialmente para a presente pesquisa mas que, mesmo cercados de cuidados, contém erros analíticos ou de precisão decorrentes, ora do método de obtenção, ora por imprecisão humana. Deve-se lembrar sempre que os valores (resultados) obtidos são estatísticos, sujeitos a anomalias.

BIBLIOGRAFIA

1. ABREU, I.B. 1981. Estudo hidrogeoquímico das águas subterrâneas do estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Curso de Pós-Graduação em Hidrologia Aplicada. 69f. Diss. Mestr. Hidrologia Aplicada.
2. ALMEIDA, F.F.M.de. 1967. Origem e evolução da plataforma brasileira. Boletim da Divisão de Geologia Mineral, Rio de Janeiro (241): 1-36.
3. BELLIENI, G. et alii. 1984. High- and low - Tio flood basalts from the Paranã plateau (Brazil): petrology and geochemical aspect bearing on their mantle origin. Meves Jahrbuch Miner. Abh, Stuttgart, 150(3):273-306, Dez.
4. BETTENCOURT, J.S. & LANDIM, P.M.B. 1974. Estudo geoquímico de rochas calcáreas do grupo Açunqui pela análise fatorial. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28, Porto Alegre, 1974. Anais. Porto Alegre, Sociedade Brasileira de Geologia. V.7, p.153-60.
5. BISCALDI, R. 1968. Problemes hydrogéologiques des régions d'affleurement des roches eruptives et metamorphiques sous climat tropical. Bulletin du Bureau de Recherches Géologiques et Minières. Section 3: Hydrogéologie, Paris (2): 7-22.
6. BRASIL, Ministério da Agricultura. Divisão de Pesquisa Pedológica. 1973. Levantamento de reconhecimento dos solos do estado do Rio Grande do Sul. Recife. 431p.

7. CARRARO, C.C. et alii. 1975. Mapa geológico do estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS. 25p. Escala 1: 1000000.
8. CATTELL, R.B. 1965. Factor analysis; an introduction to essentials. Biometrics, Washington, 21(1):190 - 215, Mar.
9. CHAYES, F. 1954. Effect of change of origin on mean and variance of two-dimensional fabrics apud PINCUS, H.J. 1956. Some vector and arithmetic operations on two-dimensional orientation variates with applications to geological data. Journal of Geology, Chicago, 64(6): 533-57, Nov.
10. CORDANI, U. et alii. 1975. Strontium isotope geochemistry of the Parana basin volcanic rocks. apud SCHOBENHAUS, C. et alii. 1984. Geologia do Brasil. Brasília, DNPM. p.347.
11. CURRAY, J.R. 1956. The analysis of two-dimensional orientation data. Journal of Geology, Chicago, 64 : 117-31.
12. CUSTÓDIO, E. & LLAMAS, M.R. 1976. Hidrologia subterránea. Barcelona, Omega. 2V.
13. DAVIS, J.C. 1973. Statistics and data analysis in geology. New York, John Wiley. 550p.
14. DERBY, O.A. 1878. Geologia da região diamantífera da província do Paraná, Brasil. Arquivos do Museu Nacional, Rio de Janeiro, 3: 89-96.
15. FISHER, R.A. 1953. Dispersion on a sphere. Proc. Royal Soc., London, 217: 295-306 apud STEINMETZ, R. 1962. Analysis of vectorial data. Journal of Sedimentary Petrology, Tulsa, 32(4): 805.
16. FOX, W. 1967. Fortran IV program for vector trend analysis of directional data. Computer Contribution, Lawrence (11): 1-35.

17. FULFARO, V.J. et alii. 1982. Compartimentação e evolução tectônica da bacia do Paraná. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, 12(4):590-611,dez.
18. HALPERN, M. et alii. 1974. Variations in strontium isotopic composition of Parana basin volcanic rocks of Brazil. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, 4: 223-7.
19. HAUSMAN, A. 1962. Aspectos hidrogeológicos das áreas basálticas do Rio Grande do Sul. In: PRIMERAS JORNADAS ARGENTINAS, Buenos Aires, 1962. Anales. s. I., sed. p.104-36.
20. HAUSMAN, A. 1966. Comportamento do freático nas áreas basálticas no Rio Grande do Sul. Boletim Paranaense de Geografia, Curitiba (18/20): 177-213.
21. HAUSMAN, A. 1987. Curso sobre águas subterrâneas; IV. Itaipava, DNPM. 57f.
22. ISSLER, R.S. 1974. Esboço geológico-tectônico do craton do Guaporé. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28., Porto Alegre, 1974. Resumo das comunicações. Porto Alegre. p.659-65.
23. JACKSON, V.L. et alii. 1973. Projeto aerogeofísico Camaquã, estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, DNPM. 221p.
24. KLOVAN, J.E. 1975. R-and Q-model factor analysis. In: MCCAMMON, R.B. Concepts in geostatistics. New York, Springer-Verlag. p.21-69.
25. KRUMBEIN, W.C. 1959. Trend surface analysis of contour type maps with irregular control-point spacing. Journal of Geophysical Research, Washington, 64(7): 823-34, July.
26. LANDIN, P.M.B. 1979. Análise estatística de dados geológicos. Rio Claro, Instituto de Geociências e Ciências Exatas da UNESP. 102p.

27. LANDIN, P.M.B. et alii. 1978. Análise da superfície de tendência. Secretaria de Obras e Meio Ambiente do Estado de São Paulo. Departamento de Águas e Energia Elétrica, São Paulo, 53pp.
28. LEINZ, V. 1949. Contribuição à geologia dos derrames basálticos no sul do Brasil. Boletim da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da USP, São Paulo, 103(5): 1-63.
29. LEINZ, V. et alii. 1966. Sobre o comportamento espacial do trapp basáltico da bacia do Paraná. Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia, São Paulo, 15(4): 70-91.
30. LOCZY, L.de. 1968. Basic and alkalic volcanics of the state of Santa Catarina, Brazil. Anais da Academia Brasileira de Ciências, Rio de Janeiro, 40 (Supl.): 187-93.
31. LOCZY, L.de & LADEIRA, E.A. 1976. Geologia estrutural e introdução à geotectônica. São Paulo, Edgard Blucher. 527p.
32. LOUIS, C. 1974. Introduction à l'hydraulique des roches. Bulletin du Bureau de Recherches Géologiques et Minières. Section 3: Hydrogéologie, Paris (4) : 283-356.
33. MARTINS, J.C.S. 1979. Pesquisa sobre o aquífero basáltico da região sudoeste do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Curso de Pós-Graduação em Hidrologia Aplicada. 75f. Diss.Mestr.Hidrologia Aplicada.
34. MATALAS, N.C. & REIHER, B.J. 1967. Some comments on the use of factor analysis. Water Resources Research, Washington. 3(1): 213-23.
35. MELFI, S.J. 1967. Potassium-argon ages for core samples of basaltic rocks from southern Brazil. Geochimica et Cosmochimica Acta, London, 31(6): 1079-1967.

36. NORTHFLEET, A.A. et alii. 1969. Reavaliação dos dados geológicos da bacia do Paraná. Boletim Técnico da Petrobrás, Rio de Janeiro, 12(3):221-46, jul/set,
37. OGAWA, A.T. & CAMPOS, H.C.S. 1982. Aplicação da análise fatorial para dados hidroquímicos do grupo Bauru no estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 2., Salvador, 1982. Anais. Salvador, ABAS. V.1, p.335-43
38. OPPENHEIM, V. 1934. Rochas gondwânicas e geologia do petróleo do Brasil meridional. Rio de Janeiro, Serviço de Fomento Produção Mineral. 129p.
39. PICADA, R.S. 1972. Ensaio sobre a tectônica do escudo sul-riograndense; caracterização dos sistemas de falhas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 25., São Paulo, 1972. Anais. São Paulo. p.167-91.
40. PINCUS, H.T. 1956. Some vector and arithmetic operations on two-dimensional orientation variates with applications to geological data. Journal of Geology, Chicago, 64(6): 533-57, Nov.
41. ROISENBERG, A. 1978. O vulcanismo ácido mesozóico da bacia do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30., Recife, 1978. Resumo das comunicações. Recife, Sociedade Brasileira de Geologia. p.89.
42. RUEGG, N.R. & MACEDO, A.B. 1974a. A variação de elementos traços nas rochas basálticas da bacia do Paraná estudada por meio da análise fatorial. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28., Porto Alegre, 1974. Anais. Porto Alegre, Sociedade Brasileira de Geologia. V.7, p.49-56.
43. RUEGG, N.R. & MACEDO, A.B. 1974b. Aplicação da análise fatorial ao estudo de elementos principais nas rochas basálticas do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28., Porto Alegre, 1974. Anais. Porto Alegre, Sociedade Brasileira de Geologia. V.7, p.153-60.

44. RUEGG, N.R. 1975. Modelo de variação química na província basáltica do Brasil meridional; características de teor, distribuição geográfica e diferenciação apud SCHOBENHAUS, C. et alii. 1984. Geologia do Brasil. Brasília, DNPM. p.347.
45. SANBERG, J.R.D. 1980. Estudo hidrogeológico nas províncias litológicas do estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Curso de Pós-Graduação em Hidrologia Aplicada. 99f. Diss.Mestr.Hidrologia Aplicada.
46. SCHNEIDER, A.W. 1964. Contribuição à petrologia dos derrames basálticos da bacia do Paraná. Porto Alegre, Escola de Engenharia da UFRGS. 76p. (Publicação Avulsa, 1).
47. SCHOBENHAUS, C. et alii. 1984. Geologia do Brasil; texto explicativo do mapa geológico do Brasil e da área adjacente incluindo depósitos minerais. Brasília, DNPM. 501p. Escala 1:2500000.
48. SILVA, A.B. da. 1984. Análise morfoestrutural, hidrogeológica e hidroquímica no estudo do aquífero cárstico do Jaíba, norte de Minas Gerais. São Paulo, Instituto de Geociências da USP. 190p. Tese.
49. SOARES, P.C. et alii. 1982a. Análise morfoestrutural regional com imagens de radar e Landsat na bacia do Paraná. São Paulo, Paulipetro. 23p.
50. SOARES, P.C. et alii. 1982b. Lineamentos em imagens de Landsat e radar; suas implicações no conhecimento tectônico da bacia do Paraná. São Paulo, Paulipetro. 22p.
51. SOARES, P.C. et alii. 1981. Aplicação da análise morfoestrutural em semi-detalle com fotos aéreas na bacia do Paraná. São Paulo, Paulipetro. 13p.
52. SOARES, P.C. et alii. 1982c. Lineamento em imagens de Landsat e radar e suas aplicações no conhecimento

- tectônico da bacia do Paraná. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2., Brasília, 1982. Anais. Brasília.
53. SOBREIRO NETO, A.F. & CAMPOS, H.C.N. 1980. Análise de agrupamento; um método auxiliar na caracterização de aquíferos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31., Camboriú, 1980. Anais. Camboriú, Sociedade Brasileira de Geologia. p.1041-56.
54. SPIEGEL, M.R. 1971. Estatística. Rio de Janeiro, McGraw-Hill. 580p.
55. STEINMETS, R. 1962. Analysis of vectorial data. Journal of Sedimentary Petrology, Tulsa, 32(4):801-12.
56. SZUBERT, E.C.; GRAZIA, C.A.; SHINTAKU, I. 1979. Projeto cobre em Itapiranga; relatório final. Porto Alegre, CPRM. V.1.
57. WERMUND, E.R. & JENKINS, W.A. 1970. Recognition of deltas by fitting trend surfaces to upper Pennsylvanian sandstones in North-Central-Texas. In: DELTAIC SEDIMENTATION MODERN AND ANCIENT SOC.ECON.PALEONT. AND MIN. p.256-69. (Special Publication, 15).
58. WHITE, I.C. 1908. Relatório final; comissão de estudos das minas de carvão de pedra do Brasil. Rio de Janeiro, Imprensa Nacional. 617p.
59. WREGE, M.L.D. et alii. 1978. Hidrodinâmica de aquíferos em derrames de basalto; pesquisa B. In: BORDAS, M.P., coord. Pesquisas aplicadas sobre o uso e conservação dos recursos hídricos do Rio Grande do Sul; relatório final. Porto Alegre, Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS. V.3 e 4.

.....

ANEXO A

DADOS DOS POÇOS LOCADOS NA REGIÃO DA PESQUISA

.....

Tabela A₁ - Dados dos poços locados na região da pesquisa.

nº DO POÇO	GRUPO	LOCALIDADE	NEA	PUEA m	q m ³ /d/m	pH	IG	ST mg/l	E m
01	I	Campina das Missões	2	30	13.7	8.7	0.016	315,3	5,0
02	II	Campina das Missões	1	171	3.6	9.8	0.075	329.4	1.4
03	IV	Campina das Missões	2	35	36.3	6.3	0.030	212,4	6.0
04	IV	Campina das Missões	2	30	29.9	7.0	0.022	152.7	3.0
05	I	Campina das Missões	2	64	4.7	7.7	0.053	275.3	4.0
06	II	Campina das Missões	2	168	14.0	8.6	0.038	236.1	3.5
07	I	Campina das Missões	3	39	10.3	7.0	0.036	216.0	6.0
08	III	Cândido Godói	2	30	20.7	7.6	0.053	312.0	6.0
09	I	Cândido Godói	2	87	8.6	7.6	0.044	167.0	6.0
10	II	Cândido Godói	3	103	12,5	10.0	0.022	391.6	2.5
11	I	Cândido Godói	2	102	29.2	7.5	0.013	171.8	4.0
12	II	Cândido Godói	2	114	8.8	9.5	0.030	491.4	12.0
13	II	Cândido Godói	2	116	9.1	8.2	0.024	341.2	5.5
14	IV	Cândido Godói	2	22	17.1	7.9	0.018	159.3	5.5
15	IV	Cândido Godói	4	147	1.6	7.6	0.016	202.6	5.6
16	I	Catuipe	2	85	5.4	8.1	0.015	163.0	9.0
17	V	Catuipe	2	94	5.7	7.9	0.039	120.0	24.0
18	IV	Cerro Largo	3	38	18.3	6.7	0.043	76.8	6.0
19	III	Giruá	4	132	50.8	7.4	0.160	125.7	3.0
20	IV	Giruá	2	22	34.0	6.7	0.008	164.0	4.0

Tabela A₁ - (continuação)

Nº DO POÇO	GRUPO	LOCALIDADE	NEA	PUEA m	q m ³ /d/m	pH	IG	ST mg/l	E m
21	V	Giruã	5	37	33.6	7.0	0.037	102.8	30.0
22	II	Giruã	2	144	3.5	8.5	0.017	306.4	3.0
23	V	Giruã	2	42	16.1	7.2	0.097	73.0	36.0
24	II	Giruã	2	202	7.6	9.9	0.021	432.0	3.0
25	I	Giruã	2	13	105.9	7.6	0.025	105.5	6.0
26	IV	Guarani das Missões	2	40	32.4	7.0	0.011	136.0	6.0
27	IV	Independência	2	84	6.8	6.9	0.089	108.7	6.0
28	IV	Independência	2	48	4.2	7.6	0.024	124.4	6.0
29	V	Guarani das Missões	2	29	20.5	6.6	0.035	125.9	18.0
30	V	Independência	4	58	26.8	6.8	0.126	77.0	25.0
31	IV	Independência	2	40	15.6	7.4	0.097	198.8	6.0
32	I	Porto Lucena	3	80	26.6	7.0	0.021	198.8	6.0
33	I	Porto Lucena	3	46	24.7	8.0	0.034	364.7	6.0
34	I	Porto Lucena	2	26	25.0	7.7	0.028	143.4	6.0
35	IV	Porto Lucena	6	26	37.9	6.9	0.032	202.6	6.0
36	I	Roque Gonzales	3	53	3.7	7.7	0.022	202.1	6.0
37	I	Roque Gonzales	2	50	21.5	7.4	0.014	378.7	6.0
38	I	Roque Gonzales	2	48	120.0	8.1	0.063	240.0	7.8
39	IV	Santa Rosa	2	28	15.9	7.1	0.019	138.2	6.0
40	IV	Santa Rosa	5	65	15.9	7.7	0.046	200.8	5.4

Tabela A₁ - (continuação)

Nº DO POÇO	GRUPO	LOCALIDADE	NEA	PUEA m	q m ³ /d/m	pH	IG	ST mg/l	E m
41	III	Santa Rosa	3	35	50.1	7.9	0.100	101.4	6.0
42	IV	Santa Rosa	2	28	11.3	6.1	0.172	66.8	6.0
43	III	Santa Rosa	2	44	131.9	8.4	0.087	112.0	3.0
44	I	Santo Cristo	1	24	26.3	7.6	0.009	241.2	6.0
45	II	Santo Cristo	2	162	5.1	8.7	0.015	527.5	6.0
46	IV	Santo Cristo	2	28	0.6	6.2	0.056	155.8	4.0
47	I	Santo Cristo	2	70	1.85	7.0	0.022	205.2	9.0
48	IV	Santo Cristo	2	146	34.3	9.2	0.021	242.0	18.0
49	I	Santo Cristo	1	14	3.4	7.0	0.033	120.3	6.0
50	I	São Pedro das Missões	3	50	50.4	7.1	0.024	269.9	6.0
51	I	São Pedro das Missões	2	47	37.7	8.4	0.022	271.2	6.0
52	I	São Pedro das Missões	1	30	5.9	7.3	0.031	187.4	6.0
53	I	São Pedro das Missões	3	64	5.3	7.2	0.044	239.0	6.0
54	I	Tuparendi	1	15	16.8	6.4	0.108	124.4	3.0
55	IV	Tuparendi	4	165	0.6	7.0	0.026	158.5	16.0
56	IV	Roque Gonzales	2	44	5.2	6.2	0.066	143.3	12.0
57	I	Roque Gonzales	3	75	4.5	7.7	0.018	220.2	7.0
58	IV	Roque Gonzales	2	30	18.3	7.1	0.033	124.3	8.0
59	I	Campina das Missões	2	73	8.9	7.9	0.021	276.1	2.0
60	IV	Cândido Godói	2	83	9.7	6.9	0.070	203.9	3.0

Tabela A1 - (continuação)

Nº DO POÇO	GRUPO	LOCALIDADE	NEA	PUEA m	q m ³ /d/m	pH	IG	ST mg/l	E m
61	III	Cerro Largo	2	92	8.9	9.3	0.145	281.0	0.8
62	III	Giruá	5	119	17.2	9.2	0.017	217.4	17.6
63	I	Guarani das Missões	1	72	7.5	8.4	0.017	233.6	2.0
64	I	Independência	2	24	15.4	7.5	0.068	500.3	5.0
65	IV	Santa Rosa	2	23	18.3	6.9	0.035	186.2	7.9
66	I	Santo Cristo	1	23	2.3	7.9	0.063	245.0	0.8
67	I	Três de Maio	2	48	10.6	7.3	0.010	212.4	0.3
68	IV	Tuparandi	4	77	14.6	7.6	0.089	133.0	3.0