

GUSTAVO BARBOSA ATHAYDE

**ANÁLISE ESTRUTURAL E HIDROQUÍMICA DO AQÜÍFERO SERRA GERAL NA
BACIA HIDROGRÁFICA DO PARANÁ III**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre pelo Curso de Pós-Graduação em Geologia Ambiental, Departamento de Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

Orientador:

Prof. Dr. Ernani F. da Rosa Filho

Co- Orientadores:

Prof. Dr. André Virmond Lima Bittencourt

Prof. Dr. Sidney Pires Rostirolla

CURITIBA

2008

Athayde, Gustavo Barbosa

Análise estrutural e hidroquímica do Aquífero Serra Geral na Bacia
Hidrográfica do Paraná III / Gustavo Barbosa Athayde. – Curitiba, 2008.
128 f. : il., tabs, grafs.

Orientador: Ernani F. da Rosa Filho
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de
Ciências da Terra, Curso de Pós-Graduação em Geologia Ambiental.
Inclui Bibliografia.

1. Hidrogeologia. 2. Hidrogeoquímica. I. Rosa Filho, Ernani F. II. Título.
III. Universidade Federal do Paraná.

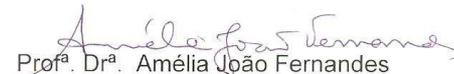
CDD 551.48

TERMO DE APROVAÇÃO

GUSTAVO BARBOSA ATHAYDE

ANÁLISE ESTRUTURAL E HIDROQUÍMICA DO AQUÍFERO SERRA
GERAL NA BACIA HIDROGRÁFICA DO PARANÁ III.

Dissertação de Mestrado aprovada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em
Geologia, área de concentração em Geologia Ambiental, da
Universidade Federal do Paraná, Comissão formada por:


Prof.^a. Dr.^a. Amélia João Fernandes
Instituto Geológico


Prof. Dr. Eduardo Chemas Hindi
Universidade Federal do Paraná


Prof. Dr. Ernani Francisco da Rosa Filho
Universidade Federal do Paraná
Presidente

Curitiba, 26 de maio de 2008.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Ernani Francisco da Rosa Filho, pela orientação desta dissertação, proveitosas discussões e oportunidades.

Aos co-orientadores Prof. Dr. Sidnei Pires Rostirolla e Prof. Dr. André Virmond Lima Bittencourt, pelas orientações, sugestões, discussões e críticas do texto.

A ITAIPU BINACIONAL, em especial ao Sr. Nelton Friderich e a bióloga Simone Benassi, pelo apoio e financiamento deste projeto.

Ao SAAE – Serviço Autônomo de Água e Esgoto do município de Marechal Cândido Rondon pelo fornecimento dos dados meteorológicos e laudos físico-químicos, em especial ao colega Químico Laércio Miguel Richter pelo acompanhamento durante as etapas de campo.

Ao Geólogo Dr. Eduardo Chemas Hindi pela participação na banca, revisão do texto e ensinamentos durante as etapas desta pesquisa.

Aos colegas do Laboratório de Pesquisas Hidrogeológicas pelas análises físico-químicas.

Ao Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada, em especial a Geóloga M.S. Alessandra Bongioiolo pelo fornecimento e análise dos dados aeromagnéticos.

Aos meus pais pelo apoio e construção do meu conhecimento ao longo da vida, esta dissertação é “parte dos frutos” desde investimento. Aos meus irmãos pelo apoio e incentivo em todas as etapas de minha vida. Minha família é bem bacana....

À Geóloga M.Sc. Camila de Vasconcelos Müller Athayde pela revisão dos dados hidroquímicos, companheirismo e apoio incondicional em todas as etapas desta pesquisa.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE TABELAS.....	ix
RESUMO.....	x
ANSTRACT.....	xi
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVOS.....	2
2. MATERIAL E MÉTODOS	3
2.1 BASE CARTOGRÁFICA UTILIZADA.....	3
2.2 ANÁLISE MULTI-ESCALA DE LINEAMENTOS ESTRUTURAIS	4
2.2.1. TRAÇADO DOS LINEAMENTOS ESTRUTURAIS	5
2.2.2. MAPA DE ISODENSIDADES DE LINEAMENTOS	5
2.3 ANÁLISE HIDROGEOQUÍMICA	7
2.3.1. PROCESSAMENTO DOS DADOS HIDROQUÍMICOS	8
2.3.2 MAPA DE ISOVALORES	11
2.3.3. QUALIDADE DAS ÁGUAS PARA IRRIGAÇÃO	11
2.4 BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO	13
3. CARACTERIZAÇÃO REGIONAL DO TERRITÓRIO	16
3.1. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL.....	18
3.1.1 FM. SERRA GERAL NO ESTADO DO PARANÁ	19
3.1.2 ARCABOUÇO ESTRUTURAL DA BACIA SEDIMENTAR DO PARANÁ.....	22
3.2. HIDROGEOLOGIA REGIONAL	25
3.2.1 O AQUÍFERO SERRA GERAL NO ESTADO DO PARANÁ	25
3.3. CLIMA NO ESTADO DO PARANÁ.....	31
3.1.4.1 Balanço hídrico climatológico da bacia do rio Ajuricaba, Marechal Cândido Rondon / PR.	37
3.1.4.1.1 Parâmetros analisados	39
3.1.4.1.2 O Balanço Hídrico Climatológico.....	42
3.1.4.1.3 Relações entre fenômenos climatológicos e águas subterrâneas.....	44
3.1. GEOMORFOLOGIA DA BPIII	46
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
4.1 ANÁLISE MULTI-ESCALA DE LINEAMENTOS ESTRUTURAIS	50
4.1.1 ANÁLISE DIRECIONAL MULTI-ESCALA	51

4.1.1.1 Lineamentos 1:600.000	51
4.1.1.2 Lineamentos 1:300.000	54
4.1.1.3 Lineamentos 1:100.000	57
4.1.1 ANÁLISE COMPARATIVA DOS LINEAMENTOS TRAÇADOS	60
4.1.2 ANÁLISE DE DENSIDADE DOS LINEAMENTOS ESTRUTURAIS	61
4.1.2.1 Análise da Densidade dos Lineamentos Estruturais 1:600.000	63
4.1.2.2 Análise da Densidade dos Lineamentos Estruturais 1:300.000	64
4.1.2.3 Análise da Densidade dos Lineamentos Estruturais 1:100.000	65
4.2 IMPLICAÇÕES DO ARCABOUÇO ESTRUTURAL NAS VAZÕES DA BPIII	66
4.2.1 DISTRIBUIÇÕES DAS VAZÕES NA BPIII.....	66
4.3 HIDROGEOQUÍMICA DA BPIII.....	71
4.3.1 CLASSIFICAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	76
4.3.1.1 Águas do tipo sulfatada-bicarbonatada sódica	76
4.3.1.2 Águas do tipo bicarbonatada-carbonatada sódica	77
4.3.1.3 Águas do tipo carbonatada sódica.....	78
4.3.1.4 Águas do tipo bicarbonatada sódica-cálcica	79
4.3.1.5 Águas do tipo bicarbonatada cálcica-sódica	80
4.3.1.6 Águas do tipo bicarbonatada sódica.....	81
4.3.1.7 Águas do tipo bicarbonatada cálcica.....	82
4.3.2 QUALIDADE DAS ÁGUAS PARA IRRIGAÇÃO	83
4.3.3 ANÁLISE NUMÉRICA E DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS DADOS.....	84
4.3.3.1 Bicarbonato	86
4.3.3.2 Carbonato	88
4.3.3.3 Cloreto.....	90
4.3.3.4 Fluoreto	92
4.3.3.5 Sulfato	94
4.3.3.7 Sílica.....	96
4.3.3.8 Cálcio	98
4.3.3.9 Magnésio.....	100
4.3.3.10 Sódio	102
4.3.3.11 Potássio	104
4.3.3.13 pH.....	106
4.3.3.14 Condutância específica.....	108
4.3.3.16 Sólidos totais dissolvidos	110
4.3.3.18 Temperatura	112
4.3.4 RELAÇÕES POTENCIOMÉTRICAS E MISTURA DE ÁGUAS ENTRE OS AQUÍFEROS SERRA GERAL E BOTUCATU NA ÁREA DA BPIII.....	114
4.3.4.1 Tipologia química do Aquífero Botucatu (Aquífero Guarani) na BPIII	115
4.3.4.2 Perfil hidrogeológico.....	117
5. CONCLUSÕES	121
6. REFERENCIAS	123

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	1
FIGURA 2 - MATERIAIS UTILIZADOS NA COLETA DAS AMOSTRAS (PH E CONDUTIVIMETRO PORTÁTEIS, ÁGUA DEIONIZADA, FENALFTALEINA, ETC).....	8
FIGURA 3 - BACIAS HIDROGRÁFICAS DO PARANÁ E DETALHE DA REDE DE DRENAGEM DA BPIII.....	16
FIGURA 4 - DIVISÃO REGIONAL E SEDES MUNICIPAIS DA BPIII.....	17
FIGURA 5 - MAPA DA BACIA DO PARANÁ, MODIFICADO DE MILANI <i>ET AL.</i> , (1997).	18
FIGURA 6 - MAPA DA FM. SERRA GERAL NO ESTADO DO PARANÁ E A LOCALIZAÇÃO DA BACIA DO PARANÁ III.....	20
FIGURA 7 – ILUSTRAÇÃO DOS DERRAMES BASÁLTICOS. A ORDEM NUMÉRICA REPRESENTA A ORDEM DE EXTRAVASAMENTO DOS DERRAMES. 1 – MAIS ANTIGO; 4 – MAIS NOVO (MODIFICADO DE CPRM).....	21
FIGURA 8 - DIFERENTES LITOTIPOS ENCONTRADOS NA ÁREA DE ESTUDO. FOTOGRAFIAS DO AUTOR NA PEDREIRA MUNICIPAL DE TOLEDO – PR.....	21
FIGURA 9 – ARCABOUÇO TECTÔNICO DA BACIA DO PARANÁ, MODIFICADO DE MILANI <i>E TAL.</i> ,(1997).....	22
FIGURA 10- LOCALIZAÇÃO DA BPIII NO CONTINENTE E OS DADOS DO PROJETO <i>WORLD STRESS MAP</i> (2006).	24
FIGURA 11 – PRINCIPAIS AQUÍFEROS DO ESTADO DO PARANÁ E A LOCALIZAÇÃO DA ÁREA EM ESTUDO.	25
FIGURA 12 – MODELO DE CIRCULAÇÃO NO AQUÍFERO SERRA GERAL (FERNANDES, 2006) ...	26
FIGURA 13 - NÚMERO DE OUTORGAS CONCEDIDAS PELA SUDERHSA POR UNIDADE AQUÍFERA ATÉ O ANO DE 2005.....	27
FIGURA 14 - ZONA VESICULAR / AMIGDALOIDAL (TOPO DE DERRAME) EM BASALTO DA FM. SERRA GERAL E PERCOLAÇÃO DE ÁGUA NAS FRATURAS DO BASALTO.....	28
FIGURA 15 - DIAGRAMA DE PIPER DO AQUÍFERO SERRA GERAL. FONTE: ROSA FILHO E HINDI (2006)	30
FIGURA 16 - DIAGRAMA DE CLASSIFICAÇÃO DE ÁGUA PARA IRRIGAÇÃO. FONTE: (ROSA FILHO E HINDI, 2006)	31
FIGURA 17 - CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA REGIONAL DA ÁREA EM PESQUISA, MODIFICADO DE IAPAR, 2009).....	33
FIGURA 18 - DIREÇÃO PREDOMINANTE DOS VENTOS NO ESTADO DO PARANÁ.....	33
FIGURA 19 - CARTAS COM AS MÉDIAS MENSAS DE PRECIPITAÇÃO PARA O ESTADO DO PARANÁ.....	34
FIGURA 20 - CARTAS COM AS MÉDIAS MENSAS DE TEMPERATURA.....	35
FIGURA 21 - CARTAS COM AS MÉDIAS MENSAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO.	36
FIGURA 22 - LOCALIZAÇÃO DO MUNICÍPIO DE MARECHAL CÂNDIDO RONDON E DA BACIA DO AJURICABA.	38
FIGURA 23 - GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE AS TEMPERATURAS MÉDIAS MENSAS DOS ANOS DE 2004 E 2005.....	39
FIGURA 24 - GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE AS PRECIPITAÇÕES MENSAS PARA O PERÍODO ANALISADO.	40
FIGURA 25- GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE A EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL NOS ANOS DE 2004 E 2005.....	41
FIGURA 26 - GRÁFICO DOS VALORES MENSAS DE PRECIPITAÇÃO, EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL E ESCOAMENTO SUPERFICIAL NO PERÍODO ESTUDADO.	43
FIGURA 27 - BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO PARA O PERÍODO ESTUDADO.	44
FIGURA 28 - GRÁFICO DA VARIAÇÃO DO NÍVEL DINÂMICO NO POÇO TUBULAR PROFUNDO.	45
FIGURA 29 – MAPA HIPSOMÉTRICO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO PARANÁ III.	47
FIGURA 30 – MAPA DA DECLIVIDADE DO TERRENO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO PARANÁ III.	48

FIGURA 31 – MAPA DA DIREÇÃO DAS VERTENTES NA BACIA HIDROGRÁFICA DO PARANÁ III.	49
FIGURA 32 - MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO SRTM90 (USGS, 2005)	50
FIGURA 33 - DIAGRAMA DE ROSETAS PARA OS LINEAMENTOS TRAÇADOS NA ESCALA 1:600.000, À ESQUERDA ROSETA REFERENTE A FREQUÊNCIA, À DIREITA ROSETA DO COMPRIMENTO ACUMULADO DOS LINEAMENTOS.	52
FIGURA 34 - LINEAMENTOS TRAÇADOS NA ESCALA 1:600.000.	53
FIGURA 35 - DIAGRAMA DE ROSETAS PARA OS LINEAMENTOS TRAÇADOS NA ESCALA 1:300.000, À ESQUERDA ROSETA REFERENTE A FREQUÊNCIA DOS LINEAMENTOS À DIREITA ROSETA REFERENTE AO COMPRIMENTO ACUMULADO.	54
FIGURA 36 - LINEAMENTOS TRAÇADOS NA ESCALA 1:300.000.	56
FIGURA 37 - DIAGRAMA DE ROSETAS PARA OS LINEAMENTOS TRAÇADOS NA ESCALA 1:100.000, À ESQUERDA ROSETA REFERENTE A FREQUÊNCIA DOS LINEAMENTOS À DIREITA ROSETA REFERENTE AO COMPRIMENTO ACUMULADO.	57
FIGURA 38 - LINEAMENTOS TRAÇADOS NA ESCALA 1:100.000.	59
FIGURA 39 -	60
FIGURA 40 – MAPAS COM AS DIFERENTES METRAGENS DO RAIOS DE INFLUÊNCIA E GRADE.	62
FIGURA 41 - MAPA DE DENSIDADE DOS LINEAMENTOS TRAÇADOS NA ESCALA 1:600.000	63
FIGURA 42 - MAPA DE DENSIDADE DOS LINEAMENTOS TRAÇADOS NA ESCALA 1:300.000	64
FIGURA 43 - MAPA DE DENSIDADE DOS LINEAMENTOS TRAÇADOS NA ESCALA 1:100.000	65
FIGURA 44 - LOCALIZAÇÃO DOS POÇOS UTILIZADOS NA CONFECÇÃO DO MAPA DE ISOVAZÕES	67
FIGURA 45 - TRAÇADO 1:600.000	68
FIGURA 46 - TRAÇADO 1:300.000	69
FIGURA 47 - TRAÇADO 1:100.000	70
FIGURA 48 - LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS ONDE FORAM OBTIDOS OS DADOS PARA ANÁLISE HIDROGEOQUÍMICA	72
FIGURA 49 - DISTRIBUIÇÃO PERCENTUAL DAS CLASSES DE ÁGUA COM BASE NAS ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DAS AMOSTRAS COLETADAS NOS POÇOS TUBULARES PROFUNDOS DA BPIII	72
FIGURA 50 - DIAGRAMA DE PIPER COM 39 AMOSTRAS DE ÁGUA SUBTERRÂNEA DA BACIA DO PARANÁ III.	73
FIGURA 51 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS TIPOS DE ÁGUA NA BPIII	74
FIGURA 52 - DIAGRAMA DE PIPER PARA AS ÁGUAS SULFATADAS-BICARBONATADAS SÓDICAS	76
FIGURA 53 - GRÁFICO COM A MÉDIA DOS VALORES DA ÁGUA SULFATADA-BICARBONATADA SÓDICA	76
FIGURA 54 - DIAGRAMA DE PIPER PARA AS ÁGUAS BICARBONATADAS-CARBONATADAS SÓDICAS	77
FIGURA 55 - ESTATÍSTICA COM A MÉDIA DOS VALORES ÁGUA BICARBONATADA-CARBONATADA SÓDICA	77
FIGURA 56 - DIAGRAMA DE PIPER PARA AS ÁGUAS CARBONATADAS SÓDICAS	78
FIGURA 57 - GRÁFICO COM A MÉDIA DOS VALORES DAS ÁGUAS CARBONATADAS SÓDICAS	78
FIGURA 58 - DIAGRAMA DE PIPER PARA AS ÁGUAS BICARBONATADAS SÓDICAS-CÁLCICAS	79
FIGURA 59 - GRÁFICO COM A MÉDIA DOS VALORES DAS ÁGUAS BICARBONATADAS SÓDICO-CÁLCICAS	79
FIGURA 60 - DIAGRAMA DE PIPER PARA AS ÁGUAS BICARBONATADAS CÁLCICAS-SÓDICAS	80
FIGURA 61 - ESTATÍSTICA COM OS VALORES MEDIANOS DA ÁGUA BICARBONATADA CÁLCICA-SÓDICA	80
FIGURA 62 - DIAGRAMA DE PIPER PARA AS ÁGUAS BICARBONATADAS SÓDICAS	81
FIGURA 63 - GRÁFICO COM A MÉDIA DOS VALORES DAS ÁGUAS BICARBONATADAS SÓDICAS	81
FIGURA 64 - DIAGRAMA DE PIPER PARA AS ÁGUAS BICARBONATADAS CÁLCICAS	82

FIGURA 65 - GRÁFICO COM A MÉDIA DOS VALORES DAS ÁGUAS BICARBONATADAS CÁLCICAS	82
FIGURA 66 - DIAGRAMA DE CLASSIFICAÇÃO DE ÁGUA PARA IRRIGAÇÃO, COM AMOSTRAS DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA BACIA DO PARANÁ III.	84
FIGURA 67 - MUNICÍPIOS DA BPIII ONDE FOI ESTUDADA A DISTRIBUIÇÃO DOS ELEMENTOS QUÍMICOS NA ÁGUA SUBTERRÂNEA	85
FIGURA 68 - ESTATÍSTICA UNIVARIADA DO ÂNION HCO_3^-	86
FIGURA 69 - MAPA COM A DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO ISOTEORES DE HCO_3^-	87
FIGURA 70 - ESTATÍSTICA UNIVARIADA DO CO_3^{2-}	88
FIGURA 71 - MAPA COM A DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE ISOTEORES DO CO_3^{2-}	89
FIGURA 72- ESTATÍSTICA UNIVARIADA DO Cl^-	90
FIGURA 73 - MAPA COM A DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE ISOTEORES DO Cl^-	91
FIGURA 74 - ESTATÍSTICA UNIVARIADA DO F	92
FIGURA 75 - MAPA COM A DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE ISOTEORES DO F	93
FIGURA 76 - ESTATÍSTICA UNIVARIADA DO SO_4^{2-}	94
FIGURA 77 - MAPA COM A DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE ISOTEORES DE SO_4^{2-}	95
FIGURA 80 - ESTATÍSTICA UNIVARIADA DA SiO_2	96
FIGURA 81 - MAPA COM A DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE ISOTEORES DA SiO_2	97
FIGURA 82 - ESTATÍSTICA UNIVARIADA DO Ca^{2+}	99
FIGURA 83 - MAPA COM A DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE ISOTEORES DO Ca^{2+}	99
FIGURA 84 - ESTATÍSTICA UNIVARIADA DO Mg^{2+}	100
FIGURA 85 - MAPA COM A DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE ISOTEORES DO Mg^{2+}	101
FIGURA 86 - ESTATÍSTICA UNIVARIADA DO Na^+	102
FIGURA 87 -MAPA COM A DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE ISOTEORES DO Na^+	103
FIGURA 88 - ESTATÍSTICA UNIVARIADA DO CÁTION K^+	104
FIGURA 89 - MAPA COM A DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS ISOTEORES DO K^+	105
FIGURA 92 - ESTATÍSTICA UNIVARIADA DOS VALORES DE PH.	106
FIGURA 93 - MAPA COM A DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS ISO-VALORES DO PH	107
FIGURA 94 - ESTATÍSTICA UNIVARIADA DA CONDUTÂNCIA ESPECÍFICA	108
FIGURA 95 - MAPA COM A DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS ISO-VALORES DA CONDUTÂNCIA ESPECÍFICA	109
FIGURA 98 - ESTATÍSTICA UNIVARIADA DOS SÓLIDOS TOTAIS DISSOLVIDOS CALCULADOS	110
FIGURA 99 - MAPA COM A DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS ISOTEORES DOS STD CALCULADOS	111
FIGURA 102 - ESTATÍSTICA UNIVARIADA DA TEMPERATURA	112
FIGURA 103 - MAPA COM A DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS ISOVALORES DA TEMPERATURA ($^{\circ}\text{C}$)	113
FIGURA 104 - CENA LANDSAT TM7 E LOCALIZAÇÃO DOS POÇOS UTILIZADOS NA ANÁLISE	115
FIGURA 105 - DIAGRAMA DE PIPER DOS POÇOS DO GUARANI NA BP III	117
FIGURA 106 - LOCALIZAÇÃO DOS POÇOS UTILIZADOS NO PERFIL HIDROGEOLÓGICO.	118
FIGURA 107 - PERFIL TOPOGRÁFICO E SUPERFÍCIE POTENCIOMÉTRICA “VIRTUAL” DOS POÇOS ESTUDADOS	119
FIGURA 108 - DIAGRAMA DE PIPER COM OS POÇOS UTILIZADOS NESTA ANÁLISE (VERMELHO: MCR 1, AZUL: PB, VERDE: PB 1 E AMARELO: MCR)	120

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PARÂMETROS ANALISADOS E MÉTODOS ANALÍTICOS CONFORME A ROTINA DO LPH.....	10
TABELA 2- VAZÕES DOS POÇOS TUBULARES PROFUNDOS LOCADOS NA FM. SERRA GERAL, SEPARADOS POR BACIAS HIDROGRÁFICAS	29
TABELA 3 - MÉDIAS MENSIS DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL.	41
TABELA 4- VALORES MÉDIOS MENSIS DE PRECIPITAÇÃO, EVAPOTRANSPIRAÇÃO POTENCIAL, ESCOAMENTO SUPERFICIAL E O SALDO PARA O PERÍODO ENTRE DEZEMBRO DE 2004 E DEZEMBRO DE 2005, NOTAR EM NEGRITO OS MESES COM EXCEDENTE HÍDRICO.	43
TABELA 5 - FREQUÊNCIA E COMPRIMENTO ACUMULADO DOS LINEAMENTOS NA ESCALA 1:600.000	51
TABELA 6 - FREQUÊNCIA E COMPRIMENTO ACUMULADO DOS LINEAMENTOS NA ESCALA 1:300.000	54
TABELA 7 - FREQUÊNCIA E COMPRIMENTO DOS LINEAMENTOS TRAÇADOS NA ESCALA 1:100.000	57
TABELA 8 - ESTATÍSTICA DOS DADOS DE VAZÃO DOS POÇOS (M ³ /H).....	66
TABELA 9- MÉDIAS DAS PRINCIPAIS CONCENTRAÇÕES DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DOS DIVERSOS TIPOS DE ÁGUA SUBTERRÂNEA NA BPIII.....	75
TABELA 10 - PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS DOS POÇOS UTILIZADOS.....	115

RESUMO

O Aquífero Serra Geral (ASG), formado pelos basaltos e derivados da Fm. Serra Geral ocorre, no Estado do Paraná, em uma área de aproximadamente 109.000 km². As águas do aquífero são explotadas, principalmente, para abastecimento público e, em menor escala por indústrias, hotéis e irrigação. A área de estudo localiza-se na região oeste do Estado do Paraná, compreendendo toda a Bacia Hidrográfica do Paraná III (BP III). Os objetivos desta pesquisa foram: caracterizar as principais direções de lineamentos estruturais existentes e suas densidades, utilizando para isso a análise multiescala de lineamentos, bem como a análise hidroquímica da água subterrânea. Perfis construtivos de poços e dados hidrogeológicos foram usados para um melhor entendimento do comportamento do aquífero, bem como para estudar a interação com o aquífero subjacente. As amostras de água foram coletadas em poços tubulares profundos e analisadas para determinar a concentração dos íons principais (cálcio, magnésio, sódio, potássio, bicarbonato, cloreto, sulfato, nitrato, entre outros); total de sólidos dissolvidos e sílica. Alcalinidade, temperatura, pH e condutividade foram medidos em campo. Os tipos químicos de água foram definidos usando o diagrama de Piper. Os tipos de água determinados foram: bicarbonatada cálcica; bicarbonatada sódica; bicarbonatada sódica-cálcica; bicarbonatada cálcica-sódica; bicarbonatada-carbonatada sódica; carbonatada sódica; sulfatada-bicarbonatada sódica. Os resultados químicos dos parâmetros foram plotados em mapas de isolinhas, buscando caracterizar a distribuição espacial dos teores, assim como a relação entre valores elevados e aspectos da geologia estrutural local. O resultado desta pesquisa mostra que o ASG deve ser considerado como fonte estratégica para o abastecimento público em função da qualidade *in natura* de suas águas, bem como pode ser utilizado, de maneira geral, como alternativa para irrigação em períodos de prolongada estiagem. Para um aproveitamento sustentável de suas potencialidades, todas as locações devem ser precedidas de análise estrutural / geomorfológica detalhada, que definam controles estruturais que governem o fluxo do aquífero.

Palavras-Chaves: Bacia do Paraná III; Aquífero Serra Geral, Análise multi-escala de lineamentos e hidrogeoquímica.

ABSTRACT

THE SERRA GERAL AQUIFER (SGA) IS CONSTITUTED BY VOLCANIC ROCKS FROM SERRA GERAL FORMATION AND IS LOCATED IN THE STATE PARANÁ, OVER AN AREA OF NEARLY 109.000 KM². THE AQUIFER IS MAINLY EXPLOITED AS A PUBLIC WATER SUPPLY, AND SECONDARY, FOR HOTELS, INDUSTRY AND IRRIGATION. THE STUDIED AREA IS LOCATED IN WEST OF STATE PARANÁ, OVER THE PARANÁ HYDROGRAPHIC BASIN III (BPIII). THE AIM OF THIS RESEARCH WERE TO INVESTIGATE LINEAMENTS USING SEVERAL REMOTE SYSTEMS, TO CHECK AT SEVERAL SCALES THE POSSIBLE STRUCTURAL CONTROL OVER THE GROUNDWATER FLOW AND CHEMICAL CLASSIFICATION. GROUNDWATER SAMPLES WERE COLLECTED IN WATER WELLS AND ANALYZED FOR THE MAJOR IONS (CALCIUM, MAGNESIUM, SODIUM, POTASSIUM, CHLORIDE, SULFATE AND NITRATE AMONG OTHERS), TOTAL DISSOLVED SOLIDS AND DISSOLVED SILICA. ALKALINITY, TEMPERATURE, PH AND SPECIFIC CONDUCTANCE WERE MEASURED IN THE FIELD. THE WATER TYPES ARE: CA-HCO₃, NA-HCO₃, NA-CA-HCO₃, CA-NA-HCO₃, NA-CO₃ AND SO₄-NA-HCO₃. THE CHEMICAL RESULTS ARE PLOTTED AS ISOLINES MAPS SHOWING THE SPECIAL VARIATIONS OF THE PARAMETERS AND LINKED TO THE MAINLY STRUCTURAL FEATURES. THE RESULTS OF THIS RESEARCH SHOW THAT THE SGA IS STRATEGIC FOR PUBLIC WATER SUPPLY AND CAN BE USED, IN EXTREME CONDITIONS TO IRRIGATION. FOR SUSTAINABLE EXPLOITATIONS THE WELL LOCATIONS NEEDS A STRUCTURAL AND GEOMORPHOLOGIC STUDIES TO KNOW THE GROUNDWATER CONTROLS.

1. INTRODUÇÃO

O Aquífero Serra Geral (ASG) é um dos mais importantes aquíferos do Estado do Paraná, em função de sua área de abrangência e principalmente, de seu potencial para abastecimento público. Trata-se de um aquífero tipo fissural, o que implica na necessidade de estudos de geologia estrutural para caracterizar direções e contextos tectônicos que configurem áreas potenciais à ocorrência de água subterrânea.

Esta dissertação aborda aspectos estruturais e hidroquímicos do ASG, na região da Bacia Hidrográfica do Paraná III (BP III), Estado do Paraná (Figura 1).

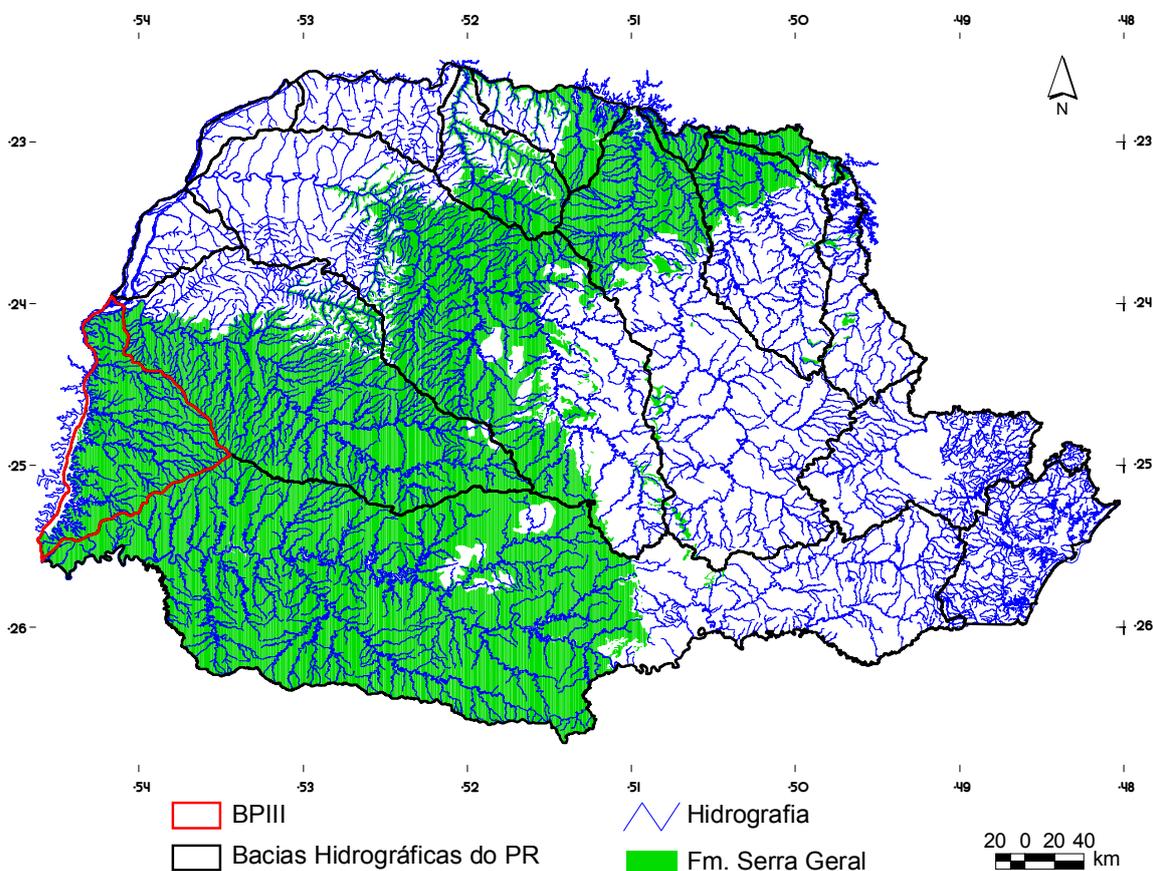


Figura 1 - Localização da área de estudo

A importância do tema em estudo é justificada pelo papel desempenhado pelo ASG, tanto em nível local como nível nacional, considerando suas dimensões, potencialidades e a qualidade das águas subterrâneas.

Através da análise multi-escala de lineamentos estruturais foram determinadas as principais direções azimutais, suas densidades e relações espaciais com os poços tubulares profundos, na área da BPIII.

Amostras de água coletadas nos poços tubulares profundos foram utilizadas para classificação hidroquímica, bem como verificar a possibilidade de uso destas águas na irrigação.

Alguns poços de água existentes na BPIII, que captam o Aquífero Serra Geral, em específico no município de Marechal Cândido Rondon (MCR), possuem vazões em torno de $90 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ e características químicas semelhantes ao Aquífero Botucatu (Guarani) em sua área de confinamento. Estes dados sugerem a existência de mistura de águas entre os aquíferos, por meio de conexão estrutural.

Os resultados obtidos nesta pesquisa recursos hídricos subterrâneos do Aquífero Serra Geral na BPIII devem ser administrados como fonte de água para abastecimento público e como alternativa na irrigação, principalmente nos períodos de prolongada estiagem.

1.1 Objetivos

O objetivo geral da pesquisa é apresentar de forma descritiva as características do ASG na BPIII.

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- Determinar as direções estruturais predominantes dos lineamentos estruturais em três escalas de análise (1:600,000; 1:300.000 e 1:100.000).
- Elaborar mapas de densidade dos lineamentos traçados nas diversas escalas de análise, das direções azimutais com maior ocorrência, bem como, a relação espacial destas áreas com os poços tubulares profundos, na área da Bacia Hidrográfica do Paraná III.
- Análise hidrogeoquímica da água de 39 poços tubulares profundos situados próximos e no município de Marechal Cândido Rondon, com a finalidade de classificar a tipologia das águas, a distribuição espacial dos teores e sua aplicação na irrigação.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Esta pesquisa foi desenvolvida com base em imagens de sensores remotos e dados hidroquímicos de poços tubulares profundos localizados na BPIII, conforme se descreve a seguir:

2.1 Base Cartográfica Utilizada

Os dados cartografados utilizados estão projetados em UTM – Fuso 21 Sul, datum SAD 69. As rotinas de processamento foram realizadas com os programas: *ArcView 3.2*; *Rockworks*; *Surfer 8*, *Global Mapper* e *Linanalist*, *Qualigraf* e *Statística 7*.

Para confecção da base cartográfica foram utilizados mapas e imagens fornecidas pela ITAIPU – BINACIONAL. Os dados, de consulta restrita à ITAIPU, referem-se ao mapeamento de detalhe realizado em toda BPIII, fornecidos no formato *shapefile*, contendo: carta de drenagem, carta plani-altimétrica e carta com as principais vias de acesso.

As imagens orbitais foram geradas por dois sistemas de sensores remotos:

- Sensor ativo: dados do radar SIR-CX-SAR da SRTM – *Shuttle Radar Topographic Mission*;
- Sensor passivo: imagem do satélite *Landsat 7 ETM+*.

As imagens orbitais foram utilizadas para análise, integração e interpretação dos lineamentos existentes na área.

A partir dos dados de radar (SRTM) foram gerados mapas de relevo sombreado, visando análises tridimensionais da superfície do terreno. Nestes mapas foram utilizadas quatro direções de iluminação no traçado dos lineamentos (N45°W, N45E, Norte e Leste).

Mapas do Estado do Paraná com a divisão municipal, sedes, principais drenagens e Bacias Hidrográficas do Paraná foram obtidos do banco de dados do LPH - Laboratório de Pesquisas Hidrogeológicas em formato *shapefile* e são referentes aos levantamentos de realizados pela SUDERHSA e Secretaria Estadual do Meio Ambiente – SEMA (2000).

O mapa geológico utilizado nesta pesquisa compreende as cartas Curitiba (Folha SG-22) e Assuncion (Folha SG-22) de autoria do Serviço Geológico do Brasil – CPRM (2004).

Os dados de vazão utilizados nesta dissertação referem-se a 119 poços tubulares profundos, 89 operados pela SANEPAR e 30 poços do SAAE de MCR. Estes dados foram utilizados para discutir a relação de poços tubulares com vazões elevadas e lineamentos estruturais.

As análises físico-químicas utilizadas na avaliação hidrogeoquímica foram coletadas durante a elaboração desta dissertação, e referem-se a 39 laudos de poços tubulares profundos do SAAE de MCR e de poços das prefeituras de Mercedes, Pato Bragado e Entre Rios do Oeste.

2.2 Análise Multi-escala de Lineamentos Estruturais

Os procedimentos adotados neste trabalho, objetivando a caracterização estrutural do Aquífero Serra Geral na BPIII, são referentes às análises de direção, densidade e frequência de lineamentos, em diferentes tipos de escala.

A escala da caracterização estrutural na área de estudo variou conforme a resolução espectral de cada um dos sistemas de sensores utilizados. A resolução dos sistemas aqui utilizados possui resolução entre 30 m (*Landsat 7 ETM+*) e 90 m (SRTM).

Para a área de estudo foram interpretados lineamentos estruturais a partir do Modelo Digital de Elevação SRTM90 (iluminações N45W, N45E, Norte e Leste) e imagens Landsat TM7, ambos fornecidos e pré-processados pela agência aeroespacial norte-americana - NASA.

Em todas as iluminações utilizadas no MDE foram traçados os lineamentos, após análise visual da coexistência em todas as iluminações, em caso positivo, o lineamento era considerado no traçado.

Os produtos e as escalas utilizadas são descritos a seguir:

- Análise do Modelo Digital de Elevação com escala de 1:600.000.
- Análise do Modelo Digital de Elevação com escala de 1:300.000.
- Análise da imagem Landsat TM7 e do Modelo Digital de Elevação com escala de 1:100.000.

2.2.1. Traçado dos Lineamentos Estruturais

O termo “lineamento” foi proposto em 1904 por Hobbs a fim de caracterizar a ligação espacial da paisagem fraturada, tornando-se um termo consagrado, devido ao uso de imagens de satélite ou fotografias aéreas.

O’Leary *et al.* (1976) definiram lineamento como sendo uma feição da superfície terrestre que é “linear”, mapeável, simples ou composta, contínua ou descontínua, cujas partes estão alinhadas em um arranjo retilíneo ou suavemente curvo e que difere distintivamente dos padrões de feições adjacentes.

A definição de lineamentos utilizada neste trabalho é aquela indicada por O’Leary *et al.* (1976).

Desta forma foram traçados sobre imagens SRTM, os lineamentos estruturais em três escalas:

- 1:600.000, traçados 165 lineamentos.
- 1:300.000, traçados 1.237 lineamentos.
- 1:100.000, traçados 10.384 lineamentos.

A área de análise destes lineamentos compreende uma área maior que a Bacia Hidrográfica do Paraná III devido à necessidade de minimizar, nos tratamentos estatísticos, os efeitos de borda (valores negativos devido à ausência de lineamentos) produzidos pelo reservatório da usina de ITAIPU BINACIONAL.

O objetivo de traçar e comparar os lineamentos em diferentes escalas é que a coexistência de feições geológicas em várias escalas de grandeza reflète o caráter tectônico dessas estruturas, caracterizando zonas de falhas geológicas e outras estruturas que possam transmitir e armazenar água.

2.2.2. Mapa de Isodensidades de Lineamentos

Densidade de lineamentos é comumente tratada como o número de segmentos isolados de lineamentos, relacionadas a uma unidade de comprimento, área ou volume, para análises em uma, duas ou três dimensões, respectivamente.

A densidade é calculada a partir de um elemento conhecido do lineamento, como por exemplo, centróide ou extremidade.

Para cada escala de análise utilizada foi elaborado um mapa de densidade total dos lineamentos traçados.

Posteriormente, também para cada escala de análise, foram elaborados dois mapas de densidade de lineamentos para as duas principais direções azimutais encontradas.

Para obtenção do atributo densidade foi utilizado o programa desenvolvido por Freitas *et al.* (2004); denominado *Linanalyst*.

Neste programa, os modelos analíticos disponíveis foram denominados “centróides”, “linhas de busca” (circulares e por grades), “grade” e “interseções”.

Nos quatro métodos o processo de análise segue o mesmo princípio, a área é segmentada em diversas células e o processamento é então executado para cada uma delas.

Nesta pesquisa, para elaboração do grid de densidade de lineamentos, foi utilizado o método “linha de busca circulares”. Neste método, segundo Rohrbaugh Jr. *et al.*,(2002), além do espaçamento da grade, o usuário indica o raio da linha de busca. O programa então detecta interseções dos lineamentos com o círculo de busca (parâmetro n) e terminações dos lineamentos que estejam inseridos no círculo de busca (parâmetro m). A partir destes dois valores são então calculados, através equações, valores de intensidade, comprimento e densidade de lineamentos.

O arquivo de saída é em formato ASCII, contendo as coordenadas centrais e extremidades de cada célula analisada, bem como e os atributos calculados.

De uma forma resumida os procedimentos computacionais para gerar mapas de isodensidades são descritos a seguir:

- Geração de tabela em formato .dbf com as coordenadas das extremidades e central de cada lineamento traçado, para inserir no *Linanalyst*.
- Escolha do modelo de análise, neste caso linhas de busca circulares.
- Geração de uma tabela com os parâmetros de direção azimutal, densidade, comprimento e frequência, como resultado final no *Linanalyst*.
- Inserir a tabela de dados gerada no *Linanalyst* no programa *Surfer 8*, para obter a malha de isodensidades dos lineamentos.

As classes azimutais mais representativas de lineamentos foram posteriormente tratadas com um filtro direcional no programa *Linanalyst*. Os lineamentos que correspondem a classes ou intervalos indicados são considerados na análise e aqueles que não satisfizerem as condições indicadas foram eliminados (análise com filtro direcional). O resultado é um mapa de densidade de lineamentos do intervalo azimutal selecionado.

Para identificar as principais direções de tensão, atualmente atuantes na placa sul-americana, utilizou-se os dados do projeto World Stress Map, neste *site*, um grupo de pesquisadores “alimenta” um banco de dados mundial sobre a direção de tensores crustais com base em deformação de poços de petróleo e terremotos.

2.3 Análise Hidrogeoquímica

Para classificar os tipos de água existentes e verificar a aplicação destas na irrigação, foi realizado a análise hidrogeoquímica e distribuição espacial dos teores na água subterrânea.

Na classificação do quimismo da água subterrânea do ASG na Bacia do Paraná III, foram utilizadas 39 análises físico-químicas de água de poços tubulares profundos.

As amostras foram coletadas em campo, onde também foram determinados os parâmetros alcalinidade, pH, condutividade elétrica e temperatura, armazenadas em caixas com isolante térmico e refrigerada, mantendo-se a temperatura das amostras em torno de 4°, utilizando os equipamentos apresentados na Figura 2.



Figura 2 - Materiais utilizados na coleta das amostras (pH e condutímetro portáteis, água deionizada, fenolftaleína, etc)

2.3.1. Processamento dos dados Hidroquímicos

O estudo do equilíbrio termodinâmico entre os minerais e a água, bem como a classificação da água quanto ao seu conteúdo iônico, dependem de análises físico-químicas que representem fielmente a composição da água no seu estado natural, dissolvidas na água na forma de íons simples ou complexos (Hindi, 1999).

Os laudos analíticos do LPH apresentam o rol mínimo de 32 parâmetros. A consistência e qualidade dos dados foram avaliadas pela Diferença de Balanço Iônico (DBI), que mede a diferença relativa entre as concentrações de cátions e ânions expressa em meq/L. As amostras tem DBI inferior a 10%, com resultado médio de 3%.

A diferença de balanço iônico foi calculada após a transformação de unidade das concentrações de mg/L para mEq/L. Esta transformação obedece a regra de Stabler, definida pela equação:

$$\text{meq/L} = \frac{\text{concentração em mg/L ou ppm} \div \text{Peso atômico do elemento}}{\text{Número de oxidação}}$$

A diferença do balanço iônico é dada pela seguinte fórmula:

$$\text{DBI} = \Sigma \text{ cátions} - \Sigma \text{ ânions} / \Sigma \text{ cátions} + \Sigma \text{ ânions}$$

Foi calculada a concentração da dureza conforme Tood (1959), onde o teor de cálcio e magnésio, expresso em carbonato de cálcio é calculado pela seguinte equação:

$$\text{Dureza} = \frac{[\text{Ca}^{+2}] \cdot (\text{CaCO}_3)}{(\text{Ca})} + \frac{[\text{Mg}^{+2}] \cdot (\text{CaCO}_3)}{(\text{Mg})}$$

$$\text{Dureza} = 2,497 [\text{Ca}^{+2}] + 4,115 [\text{Mg}^{+2}]$$

Os sólidos totais dissolvidos foram calculados, somando, para cada amostra, o resultado das concentrações de cátions e ânions obtidas dos laudos físico-químicos e a concentração da sílica. Deste resultado subtraiu-se a metade da concentração do bicarbonato:

$$\text{STD} = (\Sigma \text{ cátions} + \Sigma \text{ ânions} + \text{SiO}_2) - \text{HCO}_3^- / 2$$

Os resultados e concentrações obtidas nos laudos físico-químicos foram submetidos a análises estatísticas univariadas para determinação de parâmetros descritivos e do tipo de distribuição dos dados.

As concentrações totais das espécies iônicas e dos parâmetros físicos foram determinadas conforme descrito na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros analisados e métodos analíticos conforme a rotina do LPH

Parâmetro	Método Analítico LPH
pH	Potenciométrico
Condutividade	-
Turbidez	Método Nefelométrico
Cor	Colorímetro
Cloreto	Titulométrico - Nitrato de mercúrio
Sulfato	Turbidimétrico
Fluoreto	Colorimétrico - <i>Spadnss</i>
Fosfato	Colorimétrico - <i>Ácido Ascórbico</i>
Nitrito	Colorimétrico
Nitrato	Redução pelo Cádmio
Nitrogênio total	Kjeldahl
Nitrogênio orgânico	
Nitrogênio amoniacal	Fenato
Sólidos Totais	Gravimétrico
Sólidos Suspensos	
Sólidos Totais Dissolvidos	
Alcalinidade Total	Titulométrico
Alcalinidade à fenolftaleína	
Carbonato	
Bicarbonato	
Hidróxidos	Titulométrico
Dióxido de Carbono livre	
Acidez	Titulométrico - EDTA
Dureza	
Cálcio	Titulométrico - EDTA
Magnésio	Titulométrico - EDTA
Sódio	Emissão de chama
Potássio	Emissão de chama
Ferro total	Fenantrolina
Sílica solúvel	Molibdato

A classificação química da água foi feita pelo método de íons dominantes, utilizando-se o diagrama de Piper (PIPER, 1945), para representação dos resultados.

O diagrama triangular de Piper é usado para classificar e representar graficamente o tipo químico da água subterrânea, de acordo com a espécie predominante, e também, para definir a evolução química das águas.

Nesse diagrama, distinguem-se três campos com os dados plotados em % mEq/L:

- campo dos cátions, $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, Ca^{2+} e Mg^{2+}
- campo dos ânions, Cl^- , SO_4^{2-} e $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$
- campo dos resultados, onde os pontos encontrados nos campos anteriores são projetados.

O cruzamento do prolongamento dos dois pontos (campo dos cátions e campo dos ânions) no campo dos resultados, define a posição do ponto.

2.3.2 Mapa de isovalores

A distribuição espacial dos principais parâmetros hidroquímicos, permite avaliar condições de potabilidade da água, caracterizando zonas mais adequadas a um determinado tipo de uso (HINDI, 2007).

Para a distribuição espacial dos teores foram utilizadas 34 análises de poços tubulares coletadas em MCR, Mercedes, Entre Rios do Oeste e Pato Bragado.

Foram desconsideradas, nestes mapas, as análises dos poços localizados em Itaipulândia e Foz do Iguaçu, em função da distância entre eles e áreas com maior concentração de poços (MCR).

Os poços foram inicialmente separados segundo os teores de cada elemento, conforme distribuição estatística do primeiro ao quarto quartil. Posteriormente foram geradas curvas de isovalores, no programa Surfer, que possui, dentre os métodos disponíveis: krigagem, funções radiais, curvatura mínima, interpolação linear por triangulação, regressão polinomial e ponderação pelo inverso da distância. Utilizou-se no programa *Surfer* o método de krigagem universal para interpolação dos dados.

Os dados foram transformados para o formato *shapefile* e integraram o SIG do projeto no programa Arcview 3.3. A partir deste ponto foi possível a sobreposição e comparação com outros mapas do bancos de dados georreferenciados.

2.3.3. Qualidade das águas para irrigação

O uso da água subterrânea para irrigação é limitado pelos efeitos adversos ao solo e plantas, relacionados à presença de substâncias dissolvidas na água, associados à salinidade total da água e ao conteúdo de sódio em solução.

A água com conteúdo elevado de STD causa “risco de salinidade” sendo tóxicas para as plantas. Concentrações elevadas de sólidos dissolvidos no solo

podem causar uma condição de seca fisiológica, na qual, apesar do solo estar úmido a planta irá murchar, pois as raízes não conseguirão absorver água. A concentração de sólidos totais dissolvidos, às vezes denominada salinidade total, pode ser medida indiretamente pelo valor da condutividade elétrica da água, já que estas duas grandezas são linearmente dependentes (ROSA FILHO e HINDI, 2006).

A irrigação com água contendo quantidades significativas de Na^+ causa o “risco de sódio”, devido aos efeitos deste íon no solo. O sódio é adsorvido pelas partículas do solo, tornando-o duro e compacto quando seco e impermeável à percolação da água. Os solos de textura fina, com alto conteúdo de argila são os mais susceptíveis aos efeitos do sódio. A presença de Ca^{2+} e Mg^{2+} em altas concentrações no solo ajudam a controlar os efeitos do sódio e a manter as propriedades texturais e estruturais deste.

O risco do sódio é expresso em termos de SAR (*sodium adsorption ratio*), que compara as concentrações de Na^+ , Ca^{2+} , e Mg^{2+} na água. O SAR é calculado pela seguinte equação:

$$SAR = \frac{[\text{Na}^+]}{\sqrt{\frac{1}{2}([\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}])}}$$

Onde, $[\text{Na}^+]$, $[\text{Ca}^{2+}]$, e $[\text{Mg}^{2+}]$ são as concentrações desses íons, expressas em mmol/L.

A avaliação da qualidade da água para fins de irrigação é feita pela aplicação do diagrama que relaciona a razão de adsorção de sódio (RAS) com a condutividade elétrica da água, desenvolvido pelo U.S. Salinity Staff (1954), indicando os riscos potenciais de sódio e salinidade.

O risco de sódio é indicado no eixo das ordenadas em quatro classes de risco: baixo, médio, forte e muito forte. O risco de salinidade está indicado no eixo das abscissas em seis classes de risco: nulo, baixo, médio, alto, muito alto e excepcionalmente alto. Os campos definidos pela intercessão dessas classes definem se a água é adequada ou não para irrigação.

2.4 Balanço Hídrico Climatológico

No estudo do balanço hídrico, a abordagem de aspectos climatológicos, hidrológicos e hidrogeológicos faz-se necessário para uma correta modelagem do ciclo hidrológico.

Neste estudo os dados disponíveis foram determinantes na escolha do método utilizado. As fontes de informação disponibilizaram:

Dados de precipitação e temperatura, fornecidos pelo Serviço Autônomo de Água e Esgoto – SAAE de Marechal Cândido Rondon – PR, referentes aos anos de 2004 e 2005.

Dados do escoamento superficial obtido junto à estação de medição de vazão da ITAIPU BINACIONAL, localizada no rio Ajuricaba, município de Marechal Cândido Rondon – PR, referentes ao período de dezembro de 2004 a dezembro de 2005.

Os dados de temperatura e precipitação, obtidos pela estação meteorológica localizada na sede do Serviço Autônomo de Água e Esgoto - SAAE (coordenadas 21J UTM - E 797.740 / UTM – N 7280318), foram utilizados para calcular, juntamente com dados do escoamento superficial do rio Ajuricaba, o excedente e a deficiência hídrica, aqui neste trabalho denominado SALDO HÍDRICO, no período entre dezembro / 2004 a dezembro / 2005.

Foram utilizados dados de precipitação (volume diário acumulado, leitura às 7h 00) e temperatura do ar (valores mínimos e máximos diários).

Aos dados de temperatura foi aplicado, de forma simplificada, o balanço hídrico climatológico desenvolvido por Thornthwaite e Mather (1955) objetivando determinar a evapotranspiração potencial mensal. Este método é uma das várias maneiras de se monitorar a variação do armazenamento de água, tanto na escala diária como em escalas maiores como a mensal, utilizando-se valores médios de vários anos (normal climatológica).

O método de cálculo da evapotranspiração potencial, baseado em índices térmicos, destaca-se pela facilidade de obtenção dos dados, entretanto apresenta valores sobrelevados quando comparados à evapotranspiração real (onde o número de parâmetros avaliados é bem maior). Nesse método, a evapotranspiração potencial não corrigida de cada mês é dada pela equação um:

$$ETP_m = C\theta^a \quad (1)$$

onde “C” e “a” são os mesmos para todos os meses e calculados em função do índice térmico anual “I”, dado pelas equações dois, três e quatro:

$$a = A_1 I^3 - A_2 I^2 - A_3 I - A_4 \quad (2)$$

sendo:

$$A_1 = 675 \times 10^{-3}; A_2 = 771 \times 10^{-7}; A_3 = 179 \times 10^{-4}; A_4 = 492 \times 10^{-3} \quad (3)$$

e,

$$C = 16,2 (10/I)^a \quad (4)$$

Onde o índice térmico anual “I” é dado em função dos índices térmicos mensais “i”, é calculado a partir da equação cinco:

$$I = \sum_{i=1}^{12} i \quad \text{e} \quad i = (\theta/5)^{1,514} \quad (5)$$

Para obter a evapotranspiração potencial (ETP) em milímetros, multiplica-se os valores de ETP por um coeficiente de correção K que leva em conta a latitude (insolação) e o número de dias de cada mês.

Os resultados podem ser utilizados para fins de zoneamento agroclimático, demanda potencial de água das culturas irrigadas e no conhecimento do regime hídrico.

Dados horários de vazão (m^3/s), medidos automaticamente, na estação da ITAIPU BINACIONAL, localizada no rio Ajuricaba (coordenadas 21J UTM-E 787400 / UTM-N 7275738), no período entre dezembro de 2004 até dezembro de 2005, foram tratados estatisticamente visando determinar, no período estudado, o escoamento superficial médio neste ponto da bacia hidrográfica.

No balanço hídrico de bacias hidrográficas o deflúvio é freqüentemente expresso em milímetros de altura de água sobre a área da bacia (mm), a fim de facilitar a comparação com a precipitação e a evapotranspiração, também normalmente expressas nesta mesma unidade linear.

Para uma bacia hidrográfica de área “A” (km^2), com um deflúvio “Q” (m^3/s), durante um período “T” de dias, a transformação do deflúvio em “mm” será calculada a partir da equação de Lima (2005), apresentada na equação seis:

$$Q \text{ (mm)} = 86,4 \times \frac{T \text{ (tempo em dias)} \times Q \text{ (m}^3\text{/s)}}{\text{Área da Bacia (km}^2\text{)}} \quad (6)$$

De posse dos dados acima descritos, foi calculado o balanço hídrico climatológico do período com base na seguinte relação: SALDO = Precipitação (P) – Evapotranspiração Potencial (ETP) – escoamento superficial (ESC).

O cálculo do balanço hídrico compreendeu o período de estiagem registrado na mídia do estado do Paraná, entre os meses de dezembro de 2004 e dezembro de 2005, período onde há, nesta pesquisa, dados do escoamento superficial, disponíveis. A análise dos valores de precipitação, temperatura e evapotranspiração potencial compreendem o período entre janeiro de 2004 e janeiro de 2005.

3. CARACTERIZAÇÃO REGIONAL DO TERRITÓRIO

A rede hidrográfica do território paranaense que drena suas águas diretamente no Reservatório de ITAIPU é denominada Bacia do Paraná III (Figura 3). A BPIII está localizada na porção oeste do Estado do Paraná, entre as latitudes 24,0° e 25,6° sul e longitudes 53,4° e 54,7° oeste.

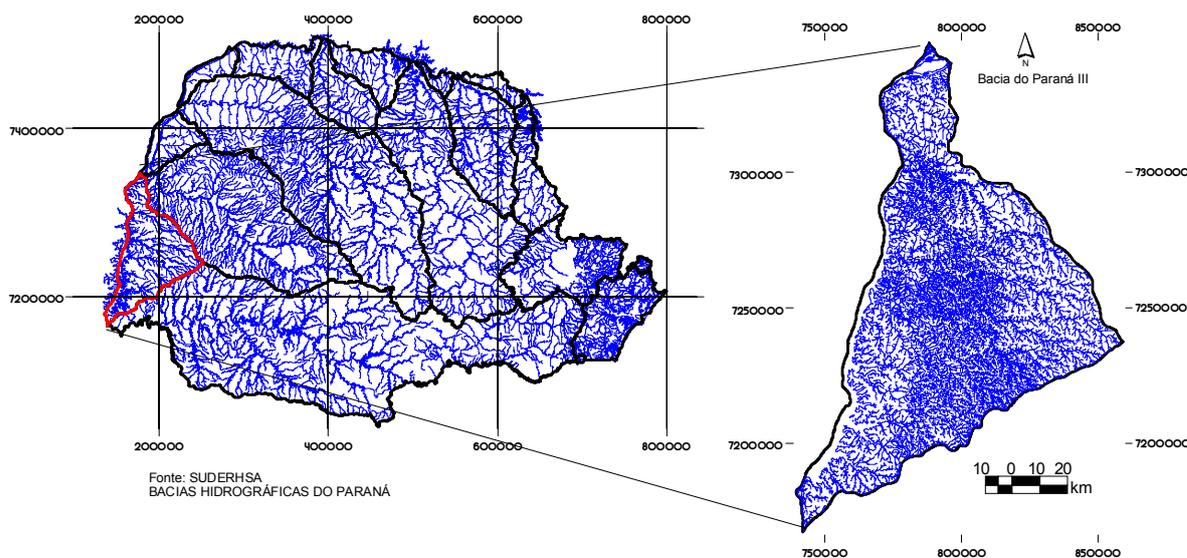


Figura 3 - Bacias hidrográficas do Paraná e detalhe da rede de drenagem da BPIII

A BPIII é subdividida em 13 sub-bacias, essa área envolve total ou parcialmente os seguintes municípios paranaenses: Cascavel, Céu Azul, Diamante do Oeste, Entre Rios do Oeste, Foz do Iguaçu, Guaíra, Itaipulândia, Marechal Cândido Rondon, Maripá, Matelândia, Medianeira, Mercedes, Missal, Nova Santa Rosa, Ouro Verde do Oeste, Pato Bragado, Quatro Pontes, Ramilândia, Santa Helena, Santa Teresa do Oeste, Santa Teresinha de Itaipu, São José das Palmeiras, São Miguel do Iguaçu, São Pedro do Iguaçu, Terra Roxa, Toledo e Vera Cruz do Oeste (Figura 4).

Cerca de 925.000 pessoas habitam os 28 municípios que compõem a bacia, destacando-se quatro destes com população superior a 70.000 habitantes (IBGE, 2006).

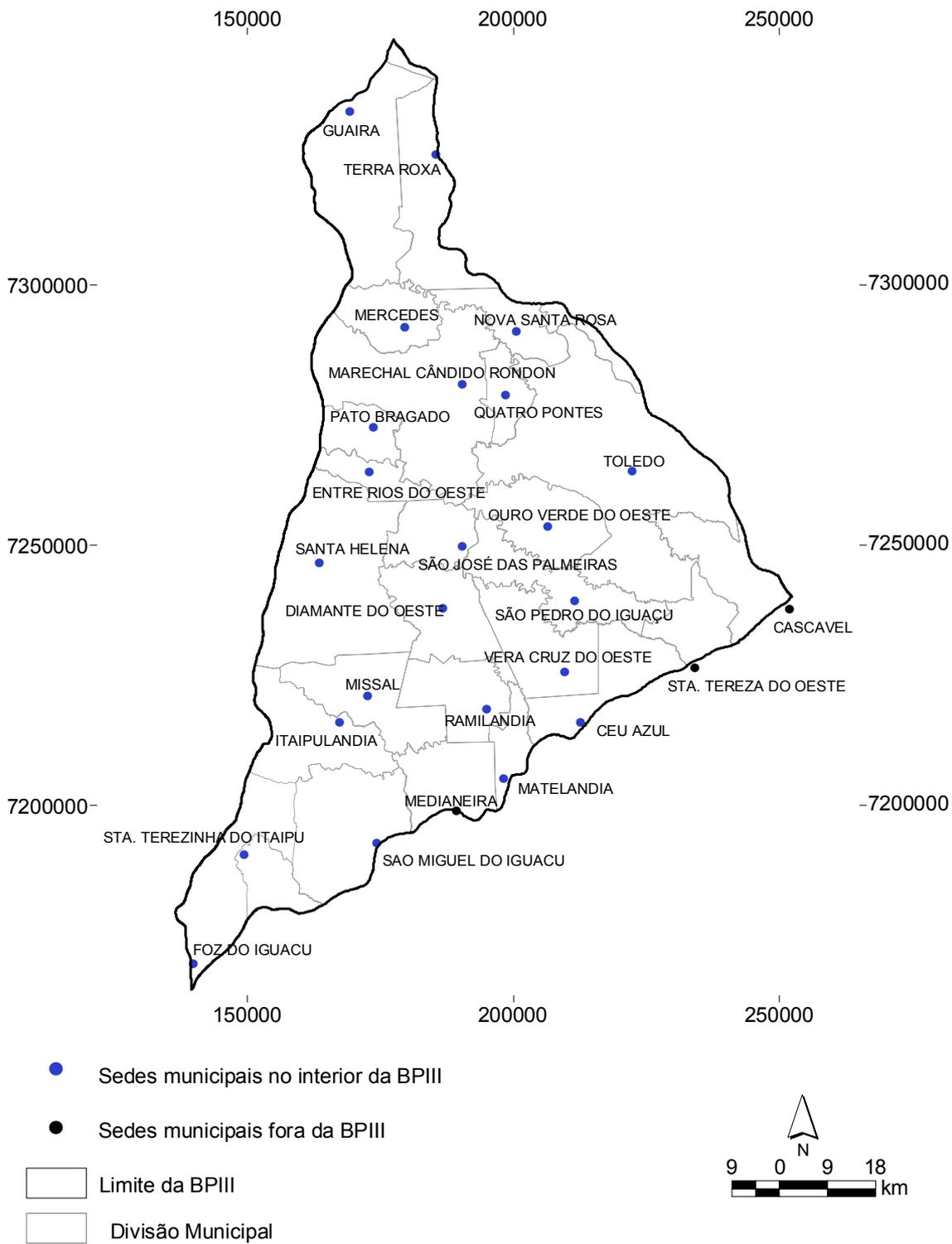


Figura 4 - Divisão regional e sedes municipais da BPIII

3.1. Contexto geológico regional

A área em estudo situa-se na entidade geológica denominada Bacia Sedimentar do Paraná.

A Bacia do Paraná é uma ampla região sedimentar do continente sul-americano que inclui porções territoriais do Brasil meridional, Paraguai oriental, nordeste da Argentina e norte do Uruguai.

A bacia tem uma forma ovalada com eixo maior N-S, sendo seu contorno atual definido por limites erosivos relacionados em grande parte a história meso-cenozóica do continente.

A Figura 5 apresenta o mapa geológico simplificado da Bacia do Paraná, com referências geográficas e profundidade do embasamento, modificado de Milani *et al.*,(1997).

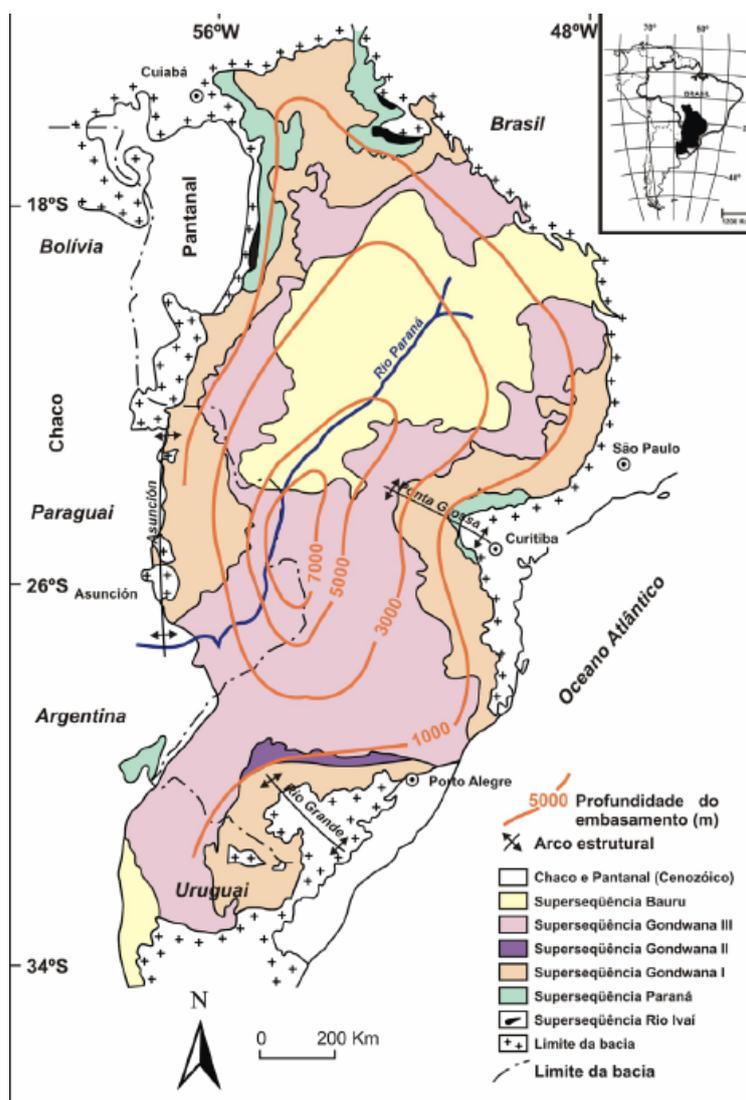


Figura 5 - Mapa da Bacia do Paraná, modificado de Milani *et al.*, (1997).

3.1.1 Fm. Serra Geral no Estado do Paraná

Abrangendo toda área em estudo, a designação de Formação Serra Geral (White, 1906), refere-se à província magmática relacionada aos derrames e intrusivas que recobrem $1,2 \times 10^6$ km² da Bacia do Paraná, abrangendo toda a região centro-sul do Brasil e estendendo-se ao longo das fronteiras do Paraguai, Uruguai e Argentina.

Os basaltos continentais da “Província Mágica do Paraná” definida por Peate *et al.*, (1992) representam grandes volumes de magma gerados em períodos relativamente curtos de tempo. Rápidas taxas de geração de magma indicam fusão parcial, em resposta a eventos extensionais, associados a abertura do Atlântico Sul.

Segundo CPRM (2006) esta unidade está constituída predominantemente por basaltos e basalto-andesitos de filiação toleítica, os quais contrastam com riolitos e riolitos aflorantes. Trata-se de uma manifestação magmática associada aos estágios precoces da ruptura do Gondwana e a abertura do Atlântico Sul.

Abrangendo a totalidade da área em estudo a Formação Serra Geral (Figura 6), considerada por Milani *et al.* (1994) como o registro mais volumoso de extravasamento intracontinental de lavas do planeta.

A Fm. Serra Geral, em termos petrológicos dominados por basaltos toleíticos e andesitos basaltos, ocorrendo subordinadas quantidades de riolitos e riolitos (Peate *et al.*, 1992). Em termos geocronológicos (K/Ar) as magmáticas possuem intervalo temporal entre 147 a 11 Ma (Amaral *et al.*, 1966).

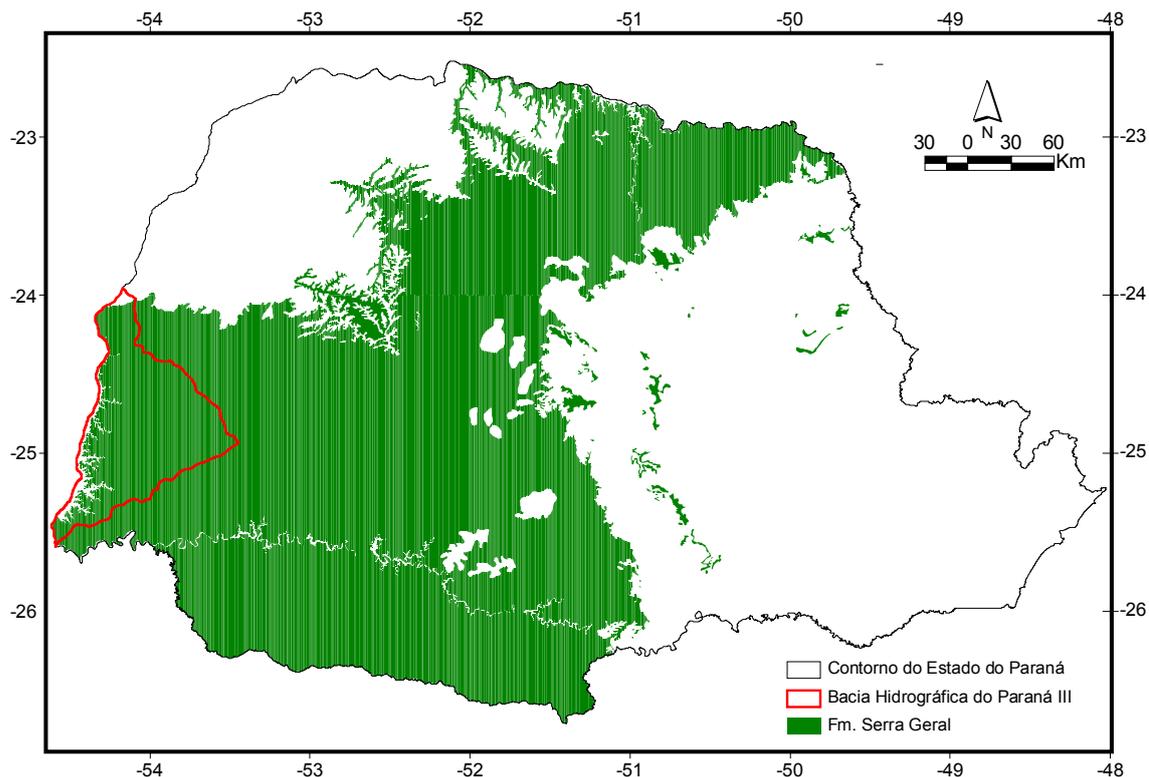


Figura 6 - Mapa da Fm. Serra Geral no estado do Paraná e a Localização da Bacia do Paraná III

De acordo com Rüegg (1969), a composição mineralógica predominante dos basaltos é formada por plagioclásios, augita e pigeonita. Ocorrem como minerais acessórios, outros silicatos e óxidos contendo principalmente alumínio, ferro, cálcio, magnésio, sódio, titânio e potássio.

Os derrames possuem textura microcristalina, estrutura maciça e vesicular e/ou amigdalóide, intenso fraturamento, bem como esfoliações esferoidais. Segundo Melfi *et al.*, (1988) as suítes vulcânicas são essencialmente sub-horizontais, com um mergulho médio de 5° em direção ao interior da Bacia do Paraná. Entretanto, os fluxos basais podem apresentar inclinações excepcionalmente altas relacionadas à topografia irregular do embasamento.

A Figura 7 apresenta um esquema dos sucessivos derrames, intercalações com formações sotopostas, bem como tipos de solo resultantes do intemperismo dos basaltos. Destaca-se também a intercalação dos basaltos com os arenitos da Fm. Botucatu.

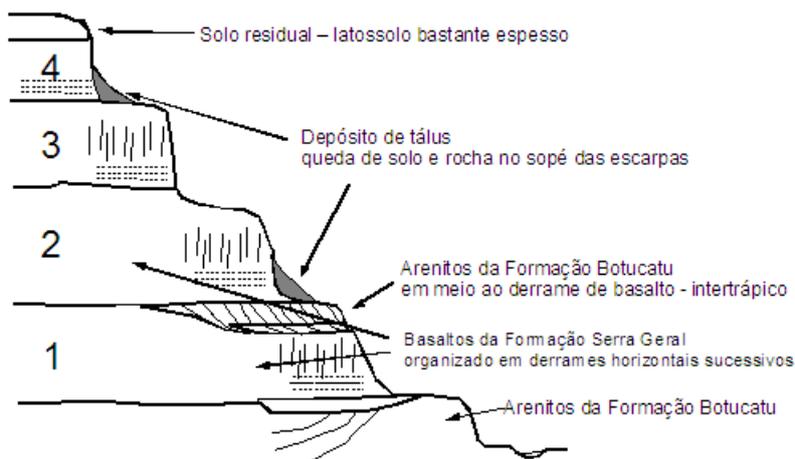


Figura 7 – Ilustração dos derrames basálticos. A ordem numérica representa a ordem de extravasamento dos derrames. 1 – mais antigo; 4 – mais novo (Modificado de CPRM)

Alguns exemplos das rochas descritas em campo, variando sua composição, ora mais ácida, ora mais básica, como peperitos e basaltos maciços podem ser observados nas fotografias da Figura 8.



Figura 8 - Diferentes litotipos encontrados na área de estudo. Fotografias do autor na pedreira municipal de Toledo – PR

3.1.2 Arcabouço estrutural da Bacia Sedimentar do Paraná

A origem da Bacia do Paraná, de alguma forma, relaciona-se ao fim do Ciclo Brasileiro (Zalán *et al.*, 1990). Portanto, a estruturação herdada do embasamento foi um dos controladores da deposição sedimentar da bacia.

O arranjo do embasamento (Figura 9, modificada de Milani *et al.*, 1997) explica em parte o arcabouço estrutural da bacia. Este é dominado por três grandes alinhamentos tectônicos, agrupados nas direções NW-SE, NE-SW e E-W.

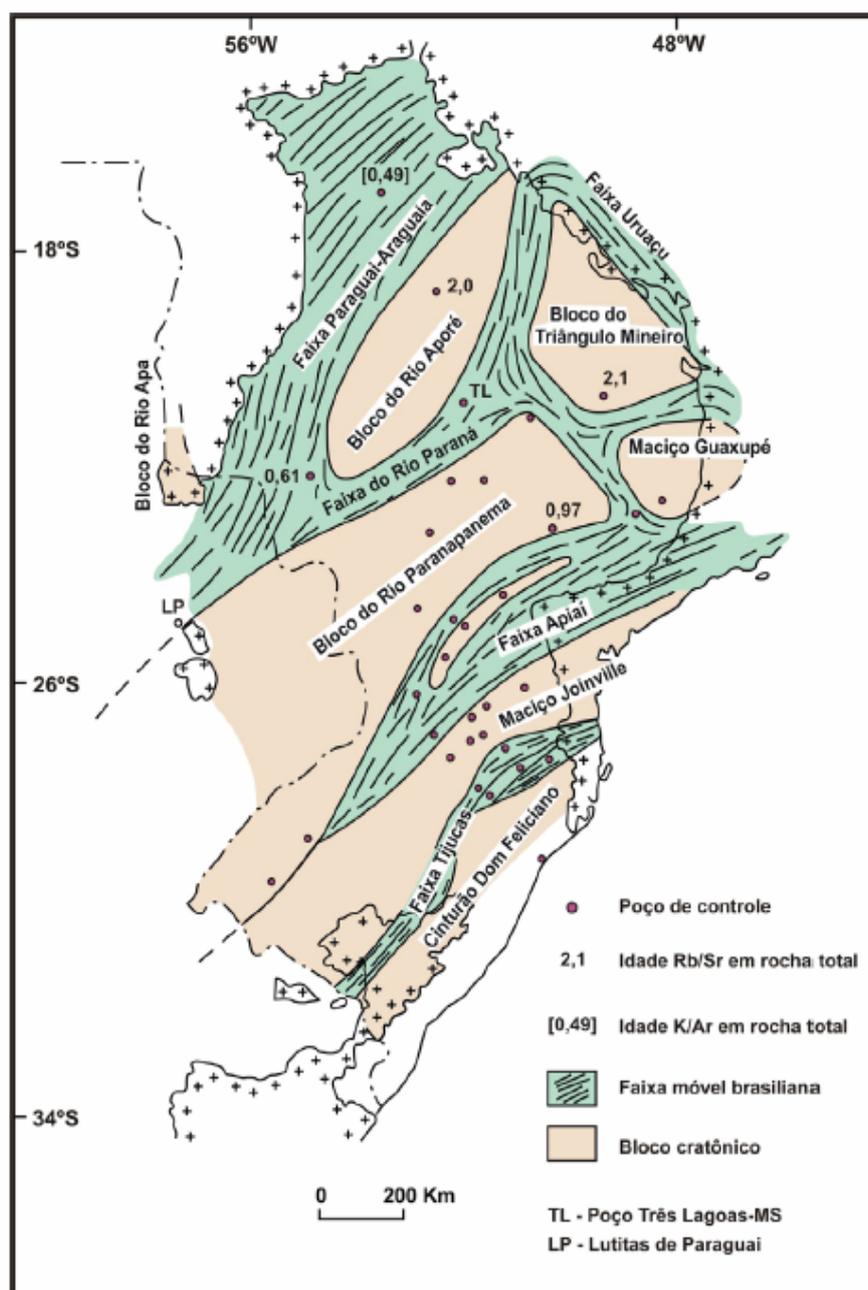


Figura 9 – Arcabouço tectônico da Bacia do Paraná, modificado de Milani e *tal.*, (1997).

Soares *et al.*, (1982) agruparam os lineamentos da Bacia do Paraná em seis sistemas preferenciais, que denominaram de Médio Ivaí (N45°W), Médio Piquiri (N65°W), Goioxim (N25°W), Médio Paraná (N35°E), Tapiracuí (N5°W) e Pitanga (N60°E). Estes autores descrevem:

A direção Médio Ivaí possui alta densidade, é correlacionável com falhas, enxames de diques e zonas de cisalhamento. Indicam zonas de fraqueza do embasamento que foram reativadas nas sucessivas fases de evolução da bacia.

As faixas estruturais identificadas correspondem a zonas de maior mobilidade tectônica, ativas durante toda evolução da bacia.

Algumas direções se superpõem a mega estruturas do embasamento, como a Direção Pitanga (N60°E), relacionada com as falhas de Taxaquara e Incofidentes – Jacutinga.

A Faixa Médio Paraná possui notável paralelismo com o Cinturão Dobrado Ribeira.

ZALÁN *et al.*, (1990) descrevem que os lineamentos NW foram reativados durante a abertura do Atlântico Sul, ao contrário do sistema NE que teria sido pouco afetado. Estes autores sugerem para os lineamentos E-W, desenvolvimento a partir do Triássico e cujo paralelismo com as zonas de fratura oceânicas sugerem alguma ligação com a abertura do Oceano Atlântico Sul.

A direção de tensão E-W na placa sul-americana é considerada por autores como Rostirolla (2005) como atuante desde a instalação dos Andes e abertura do Oceano Atlântico Sul. Corrobora com as interpretações de Rostirolla *et al.*,(2005), os dados obtidos no projeto *World Stress Map* (2006).

Na placa sul-americana os tensores podem ser visualizados na Figura 10. A direção das linhas corresponde a direção de máxima tensão medida no ponto (notar em vermelho a Bacia do Paraná 3).

A informação mais próxima a BP III, situada em território paraguaio, indica uma direção NE, muito próximo ao quadrante E-W.

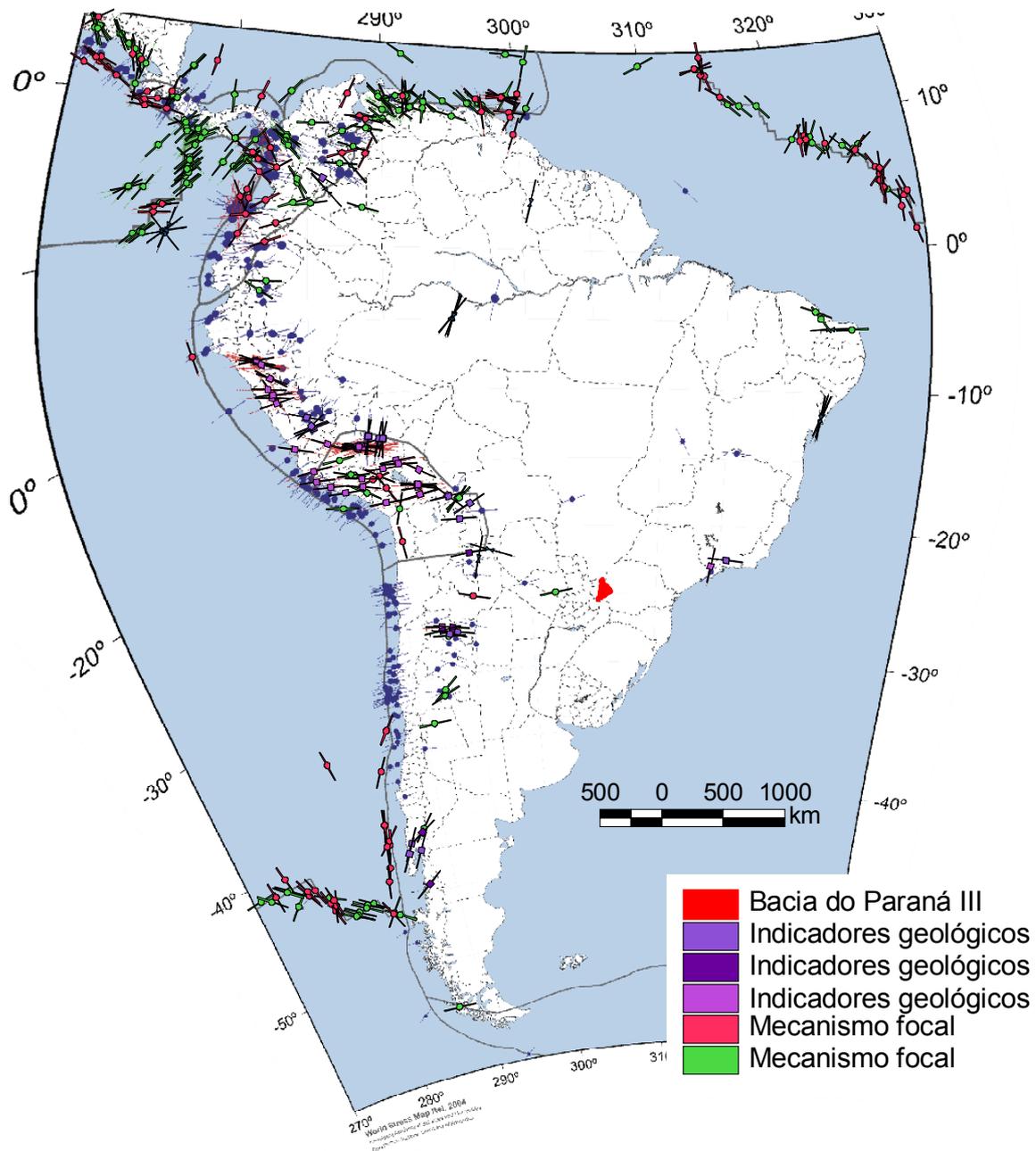


Figura 10- Localização da BPIII no continente e os dados do projeto *World Stress Map* (2006).

3.2. Hidrogeologia regional

3.2.1 O Aqüífero Serra Geral no Estado do Paraná

Dentre as unidades aquíferas existentes no Estado do Paraná (Figura 11), o aquífero denominado Serra Geral corresponde a basaltos da Formação Serra Geral, onde além das fraturas tectônicas ocorrem outros tipos de descontinuidades, importantes para a circulação e armazenamento da água, representadas por fraturas de resfriamento que podem ser verticais (disjunções colunares) ou sub-horizontais. Desta forma a maior parte do fluxo fica limitado às fraturas sub-horizontais e a algumas estruturas tectônicas sub verticais.

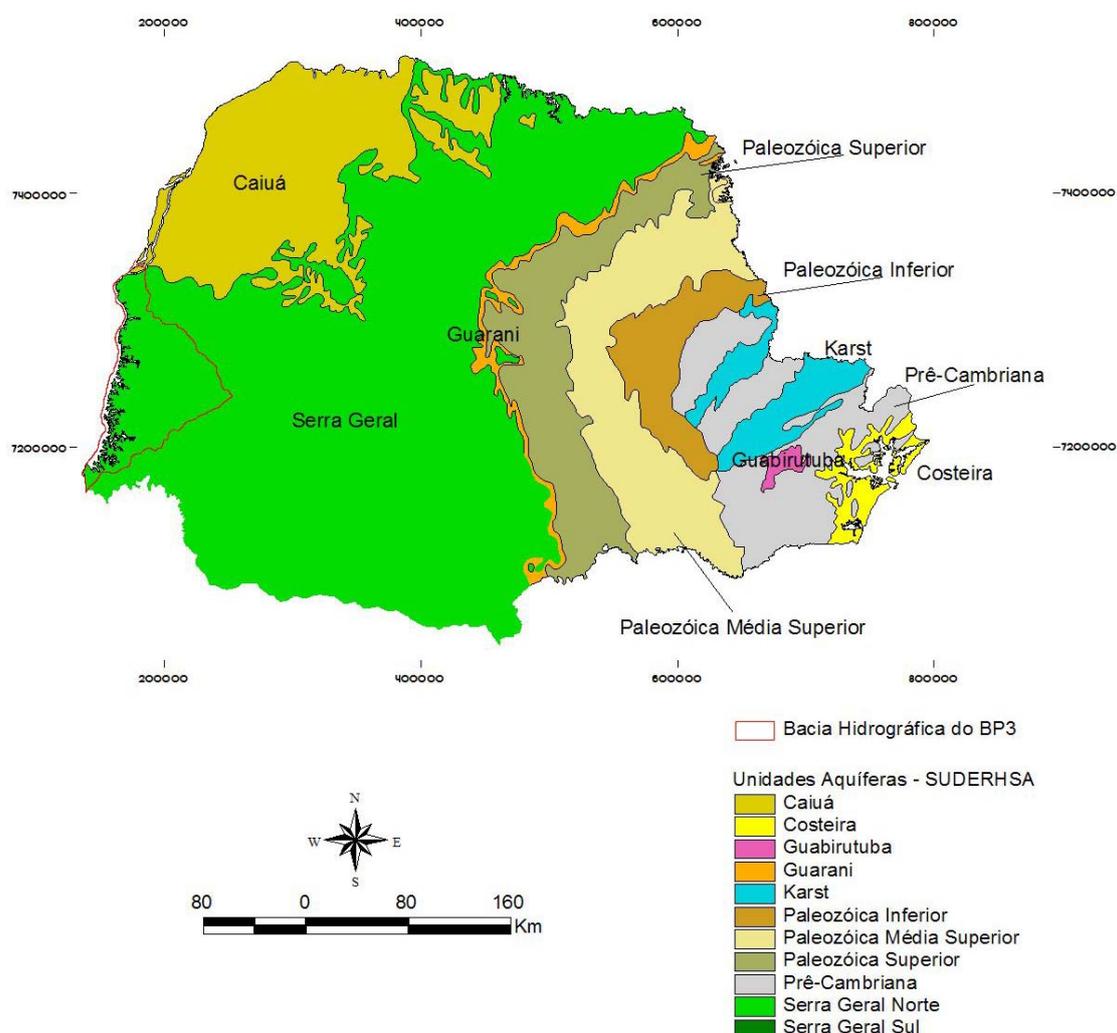


Figura 11 – Principais aquíferos do Estado do Paraná e a localização da área em estudo.

Fernandes *et al.*, (2006) propõe, em seu estudo detalhado do ASG no estado de São Paulo, um modelo conceitual de circulação das águas deste aquífero. Este modelo é apresentado na Figura 12.

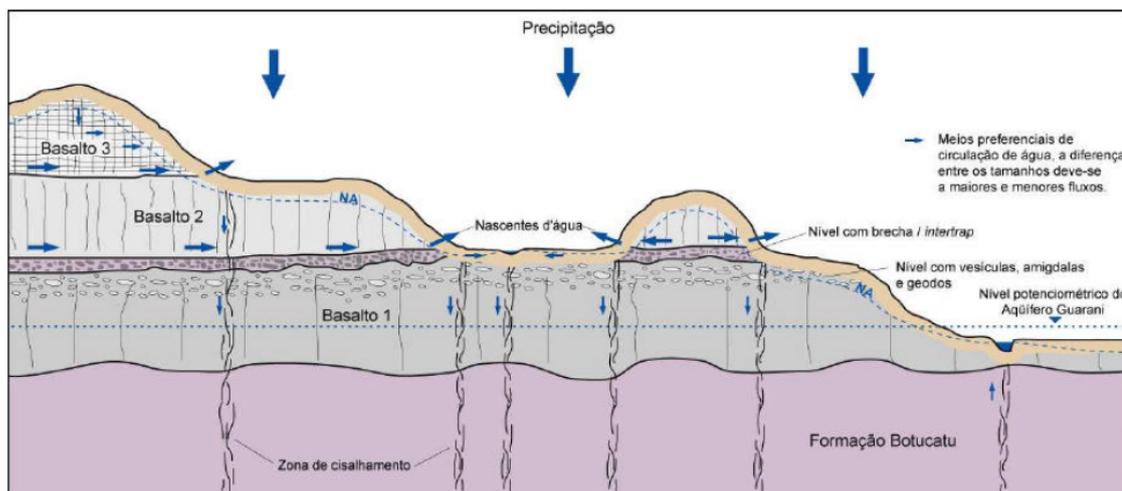


Figura 12 – Modelo de circulação no aquífero Serra Geral (Fernandes *et al.*, 2006)

Neste modelo, além das fraturas tectônicas, outros tipos de descontinuidades, importantes para a circulação e armazenamento de água, são representados por fraturas de resfriamento que podem ser verticais (disjunções colunares) ou sub-horizontais. Esta mesma autora descreve que as fraturas horizontais e pelo menos parte das verticais, de origem tectônica, estão interconectadas, bem como o nível potenciométrico do Sistema Aquífero Guarani (SAG) está acima do contato com o Aquífero Serra Geral, mas abaixo do nível potenciométrico dos basaltos.

No Estado do Paraná em função de uma maior deformação tectônica, originada pela intrusão dos diques de diabásio, em alguns casos o nível potenciométrico do Aquífero Guarani situa-se acima do nível potenciométrico do ASG, ocasionando a mistura de água entre os aquíferos.

Posicionado abaixo do Aquífero Serra Geral, sem afloramentos na área de estudo, ocorre o Aquífero Botucatu (Guarani), o qual apresenta características de águas com alto tempo de residência no aquífero.

Na região da BP III existem três poços que captam o Aquífero Guarani. No poço tubular profundo situado em MCR, a cota potenciométrica do Aquífero Botucatu por vezes é mais elevada que a cota do ASG, o que propicia a ascensão

das águas do Guarani e mistura com águas do ASG. No capítulo análise hidroquímica este tema será abordado em detalhe, com um exemplo de poços da BPIII.

3.2.2.1 Aspectos hidrodinâmicos do ASG no Estado do Paraná

Dentre as unidades aquíferas existentes no estado do Paraná, a Unidade Aquífera Serra Geral caracteriza-se como a unidade com maior número de poços outorgados pela SUDERHSA (Figura 13).

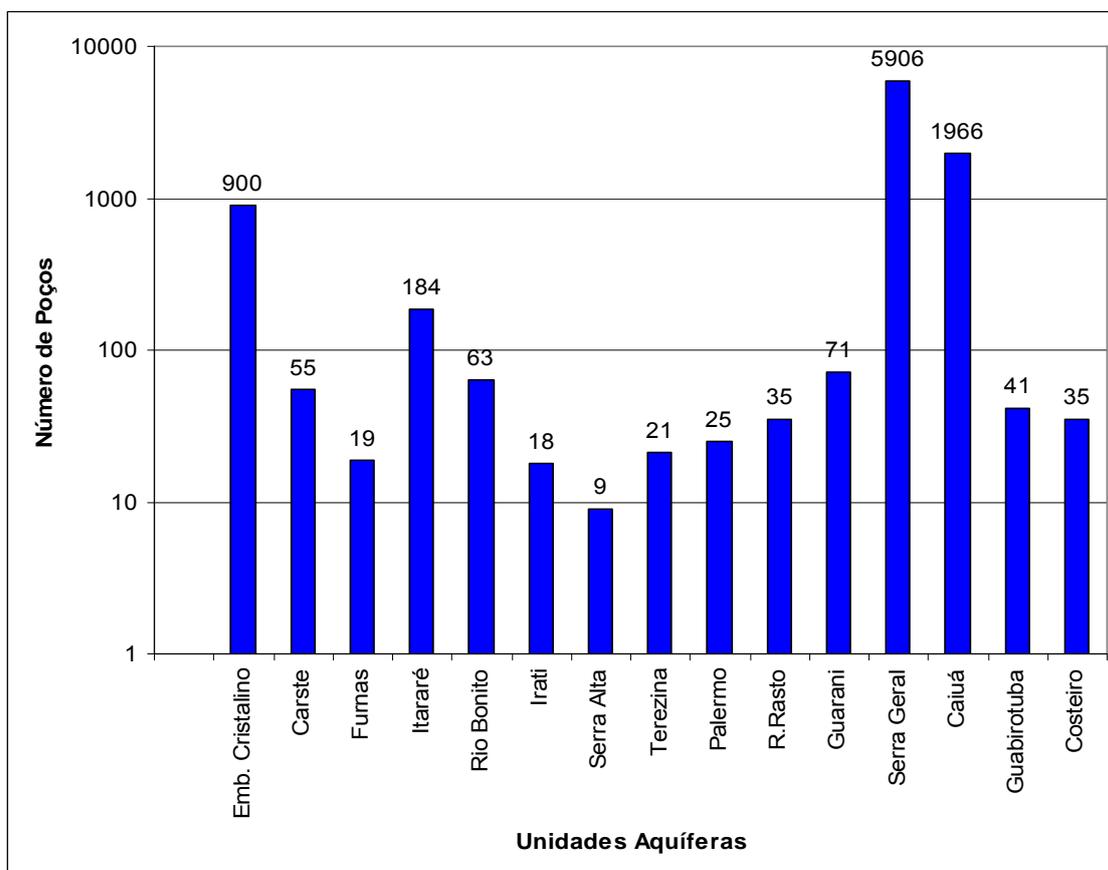


Figura 13 - Número de outorgas concedidas pela SUDERHSA por unidade aquífera até o ano de 2005

Coincidentemente as maiores vazões correspondem as bacias com maior número de poços perfurados, o que pode indicar que estes resultados ocorrem em função de um número maior de amostras.

A maior frequência das entradas de água dos poços perfurados na Fm. Serra Geral está localizada até os 110 m de profundidade, nessa faixa as vazões variam de 1 a 70 m³/h (ROSA FILHO *et al.*, 1987).

No topo de derrame, onde ocorrem as zonas vesiculares e/ou amigdalóides (Figura 14), o armazenamento de água depende da disposição espacial dos espaços vazios e da conexão entre estes espaços.



Figura 14 - Zona vesicular / amigdalóides (topo de derrame) em basalto da Fm. Serra Geral e percolação de água nas fraturas do basalto

Ao comparar os dados de vazão dos poços outorgados pela SUDERHSA, separando-os por bacias hidrográficas (Tabela 2), observa-se que a Bacia do rio Iguaçu possui a maior vazão outorgada. Entretanto a Bacia do Paraná I registra a maior média de vazão dos poços, com $33 \text{ m}^3/\text{h}$.

Os poços da BPIII, segundo dados da SUDERHSA (PARANÁ, 2006), apresentam vazão máxima de $190 \text{ m}^3/\text{h}$.

Utilizando na análise apenas os poços perfurados pela SANEPAR, na área da BPIII, os quais pressupõe-se excelente controle geológico / hidrogeológico, nota-se que a vazão média obtida nos testes de bombeamento ($42,7 \text{ m}^3/\text{h}$) é maior do que as vazões de SUDERHSA para toda a BPIII.

Tabela 2- Vazões dos poços tubulares profundos locados na Fm. Serra Geral, separados por bacias hidrográficas

Bacias Hidrográficas	Vaz. Out. Máx.	Vaz. Out Méd.	Vaz. Out. Min.	Número de poços
Cinzas	200	17	1	76
Ivaí	185	9	1	1288
Iguaçu	250	7	1	1144
Tibagi	172	13	1	516
Bacia do Paraná I	61	33	6	3
Bacia do Paraná II	27	16	5	2
Bacia do Paraná III	190	11	1	1167
Piquiri	130	10	1	931
Paranapanema 1	150	16	1	29
Paranapanema 2	50	14	1	12
Paranapanema 3	132	18	1	98
Paranapanema 4	80	19	1	20
Pirapó	100	8	1	620
Média Total m ³ /h	250	10	1,7	-

Fonte: PARANÁ (2006)

3.1.3.2 Hidrogeoquímica do ASG no Estado do Paraná

É consenso entre muitos autores que predomina a tipologia química bicarbonatada cálcica nas águas do Aquífero Serra Geral, no Estado do Paraná.

Estudos de Buchmann Filho (2002) e Bittencourt *et al.*, (2003) realizados na Bacia do Rio Piquiri (situada à nordeste da BPIII) indicam que o bicarbonato é o ânion mais abundante nessas águas. A concentração média é de 48,95 mg/L, com uma variação de 6 e 127 mg/L. Em 82 % das amostras, a concentração é inferior a 75 mg/L. Esta é uma característica bastante comum em se tratando de águas continentais relativamente diluídas. No mesmo trabalho, o bicarbonato é diretamente influenciado pelo equilíbrio do sistema CO₂ – H₂O vigente nas áreas próximas à recarga, também pelas reações de hidrólise dos silicatos das efusivas.

Segundo Bittencourt *et al.*, (2003) os principais processos que condicionam o quimismo das águas do Aquífero Serra Geral na bacia hidrográfica do rio Piquiri são: dissolução dos basaltos e equilíbrio com minerais secundários; além de misturas com águas de aquíferos sotopostos (aquífero Guarani principalmente).

Uma abordagem regional realizada por Rosa Filho e Hindi (2006) descreve para o ASG, no Estado do Paraná, teores de sólidos totais dissolvidos entre 100 e 150 mg/L, pH entre 6,6 a 7,2 e dureza em torno de 40 mg-CaCO₃/L. O teor médio de cálcio é 9 mg/L. As concentrações de magnésio variam de 3,5 a 6,5 mg/L, as de sódio, entre 1,2 a 3,7 mg/L, e as de potássio, entre 1,5 a 3 mg/L. O teor médio

de bicarbonato é 38 mg/L, o de cloreto, 1,5 mg/L e o de sulfato, 2,5 mg/L. O diagrama de Piper com todo o universo amostral utilizado pelos autores supra citados é apresentado na Figura 15.

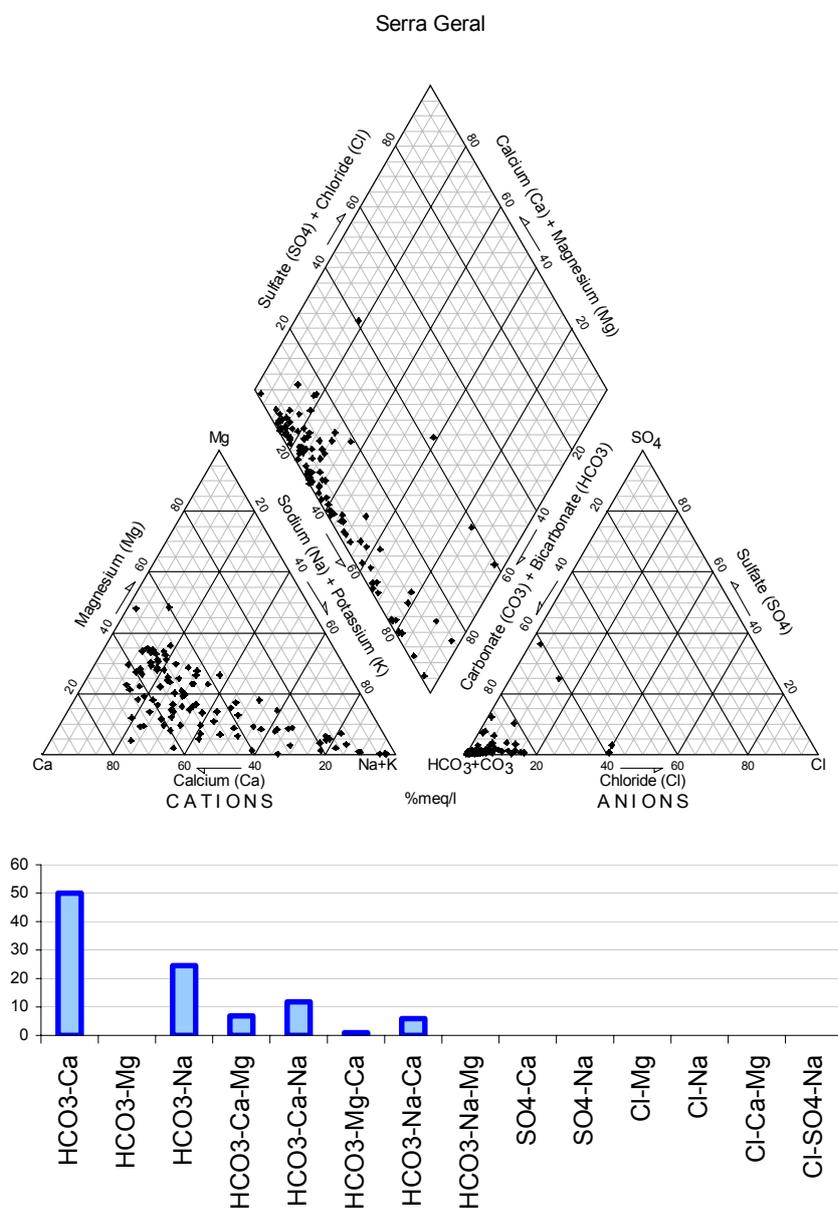


Figura 15 - Diagrama de Piper do Aqüífero Serra Geral. Fonte: Rosa Filho e Hindi (2006)

A Figura 16 mostra o diagrama de classificação de água para irrigação com amostras de água do Aqüífero Serra Geral, onde ocorrem águas com risco de sódio variando de baixo a muito forte (apenas uma amostra) e risco de salinidade de baixo a médio. Dentre as amostras analisadas apenas uma mostra-se inadequada para irrigação (ROSA FILHO e HINDI, 2006).

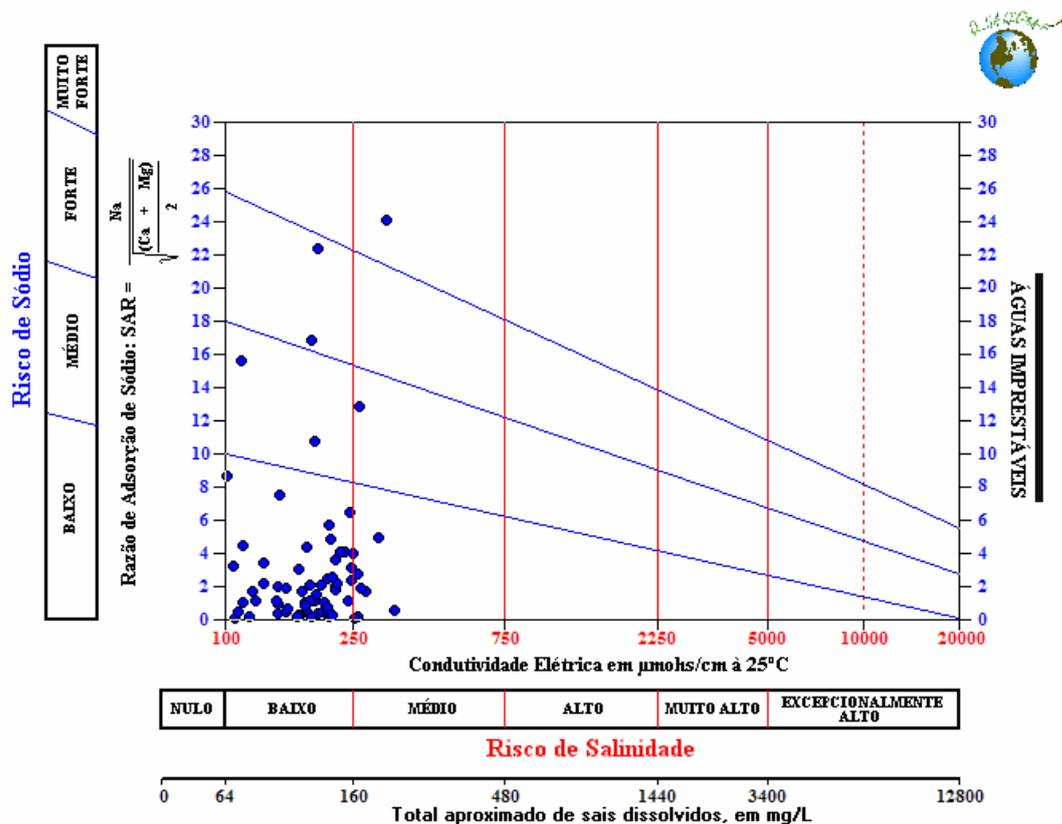


Figura 16 - Diagrama de classificação de água para irrigação. Fonte: (Rosa Filho e Hindi, 2006)

Com respeito à qualidade, as águas do Aquífero Serra Geral não apresentam, via de regra, restrições para o consumo humano *in natura*.

3.3. Clima no Estado do Paraná

Os centros básicos de ação atmosférica que controlam as condições meteorológicas do Brasil Sudeste e Meridional são o Anticiclone Sub-Tropical do Atlântico, o Anticiclone Migratório Polar, o Centro de Baixa Pressão do Chaco e as Altas Tropicais da Amazônia. O Anticiclone do Pacífico é de pouco interesse para a Região Sul Brasileira: apenas ocasionalmente, no inverno, em decorrência de seu posicionamento mais meridional, próximo ao Centro Migratório Polar, atuando sobre a Frente Polar Pacífica, promove o aumento do acúmulo de ar frio no Setor Atlântico, reforçando a Frente Polar Atlântica.

Nos Centros de Ação Atmosférica são originadas as massas de ar denominadas, respectivamente: Massa Tropical Atlântica (TA), quente e úmida,

tendendo a estável pela subsidência superior das células de alta pressão, Massa Tropical Continental (TC), instável, porém possuindo reduzida umidade; Massa Equatorial Continental, quente e instável; e as Massas Polares Atlântica e Pacífica, frias e geralmente úmidas.

Dos contatos entre essas massas de ar geram-se as “frentes”, das quais a mais importante é a Frente Polar Atlântica (FPA). Seu principal eixo de progresso é o SW-NE, e de seus avanços e recuos advém, normalmente, as situações de instabilidade da Região Sul do Brasil.

O Paraná se encontra em uma região de transição climática com acentuada variabilidade na precipitação e temperatura. A ocorrência de períodos secos durante o ano é freqüente e constitui um importante fator de quebra de safras agrícolas.

Períodos consecutivos sem chuvas maiores que 5 mm de até 103 dias foram observados durante os últimos 45 anos de observações nas estações meteorológicas do IAPAR.

Períodos secos com mais de 50 dias de duração ocorrem com uma probabilidade inferior a 20%. A duração média dos períodos secos é maior no norte e diminui em direção ao sul. Há um predomínio de ocorrência durante o período de outono-inverno e menor no verão. Não se observa uma tendência de aumento ou diminuição desses eventos dentro da série de dados observados.

Nos últimos anos tem-se observado grande irregularidade na distribuição das chuvas, dificultando as operações agrícolas em geral. Durante grande parte dos anos de 2005 e 2006 as chuvas foram abaixo da média esperada. No ano de 2006 a situação de seca se caracterizou a partir do mês de abril, passando da condição de seca meteorológica para seca agrícola, afetando as culturas do milho safrinha e do trigo, e para seca hidrológica, reduzindo a vazão dos rios e dos reservatórios. As chuvas voltaram a ocorrer no mês de setembro, revertendo a situação de seca agrícola e possibilitando o início do plantio da nova safra de verão.

A classificação climática segundo Köppen para a BPIII é Cfa (clima subtropical; temperatura média no mês mais frio inferior a 18°C (mesotérmico) e temperatura média no mês mais quente acima de 22°C, com verões quentes, geadas pouco freqüentes e tendência de concentração das chuvas nos meses de

verão, contudo sem estação seca definida), e pode ser visualizada no mapa da Figura 17.



Figura 17 - Classificação climática regional da área em pesquisa, modificado de IAPAR, 2000)

A Figura 18 apresenta a direção predominante dos ventos no estado do Paraná. Observa-se que as rosetas próximas a BP III (Palotina e Cascavel) possuem direção predominante para o quadrante nordeste.



Figura 18 - Direção predominante dos ventos no estado do Paraná. Fonte: IAPAR (2000)

A Figura 19, Figura 20 e Figura 21 apresentam a média mensal histórica, para os valores de precipitação, temperatura e evapotranspiração, respectivamente, no estado do Paraná, para uma série histórica entre 1972 a 1998.

O termo "precipitação" é definido como qualquer deposição d'água em forma líquida ou sólida proveniente da atmosfera, incluindo a chuva, granizo, neve, neblina, chuvisco, orvalho e outros hidrometeoros. A precipitação é medida em altura, normalmente expressa em milímetros. Uma precipitação de 1 mm é equivalente a um volume de 1 litro de água numa superfície de 1 m² (IAPAR, 2000).

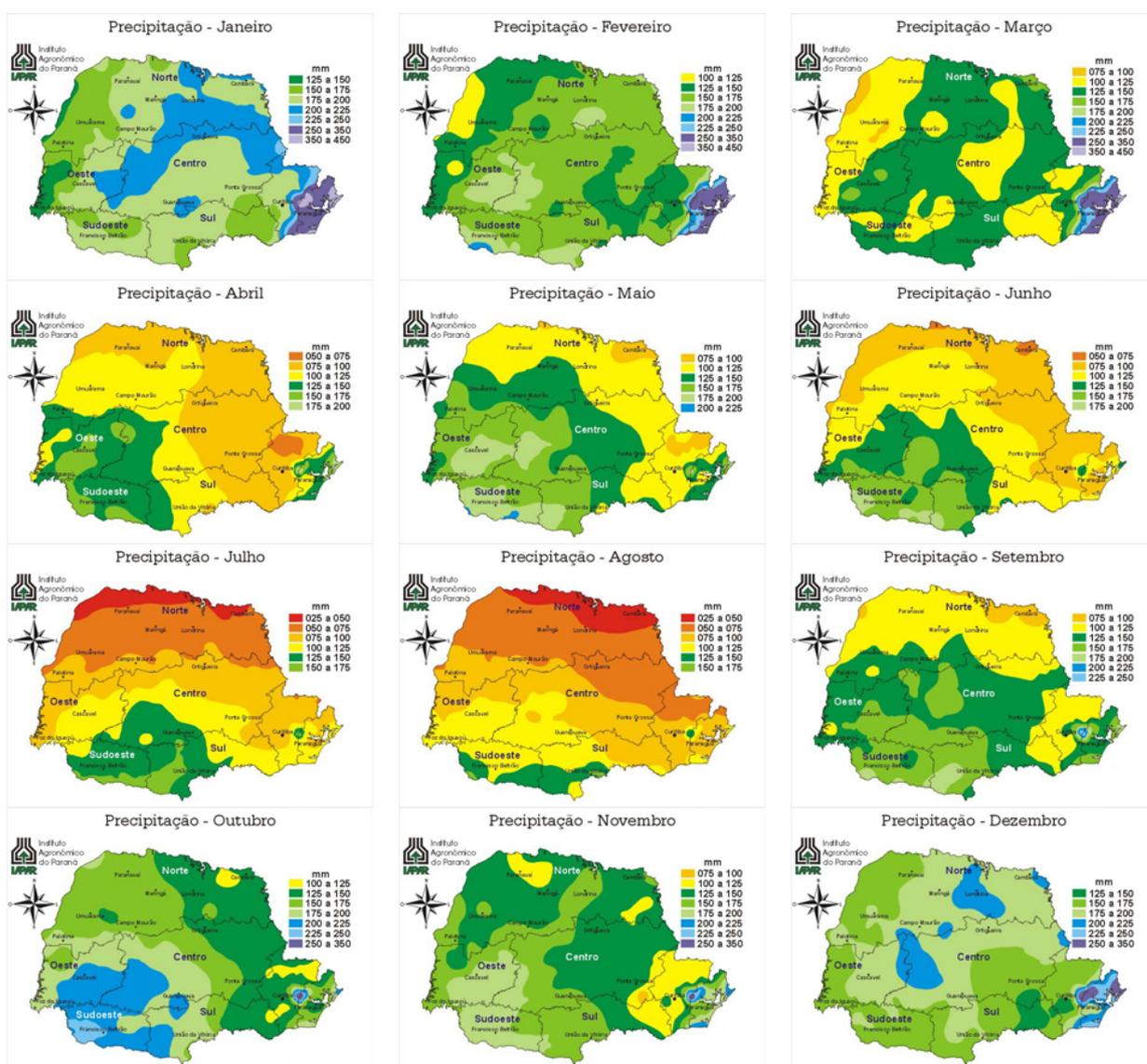


Figura 19 - Cartas com as médias mensais de precipitação para o estado do Paraná
Fonte: MODIFICADO DE IAPAR (2000)

A temperatura do ar pode ser definida em termos de movimento das moléculas de ar - a agitação das moléculas é tanto maior quanto maior for a temperatura - ou em termos relativos, com base no grau de calor que o ar contém. Para medir a temperatura são utilizados os termômetros. Existem diferentes escalas de medida da temperatura, mas a escala Celsius é a utilizada tanto nacional como internacionalmente (IAPAR, 2000).

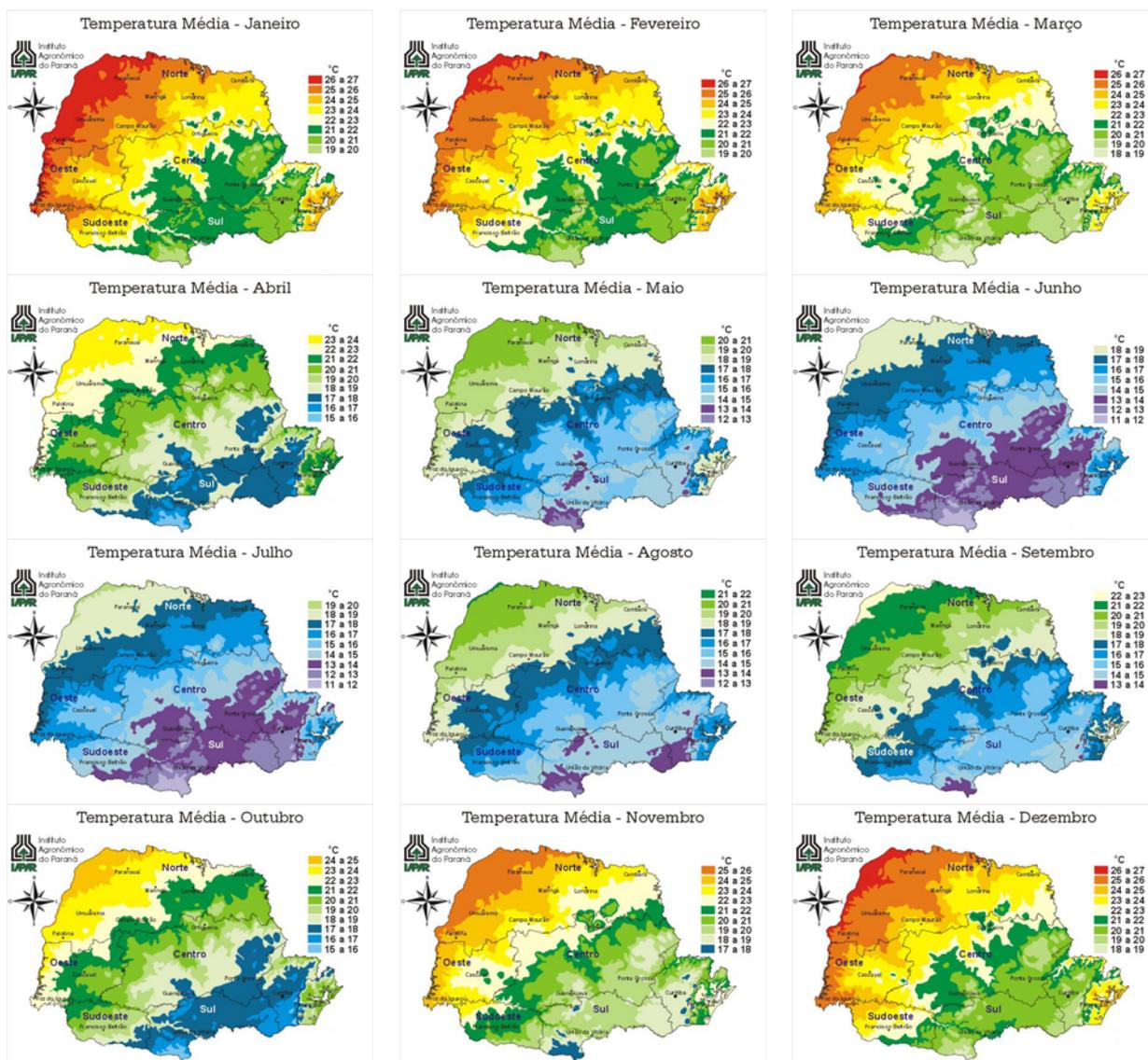


Figura 20 - Cartas com as médias mensais de temperatura.

Fonte: MODIFICADO DE IAPAR (2000)

A transferência de água de uma superfície qualquer para a atmosfera, por meio dos processos de evaporação e transpiração, é denominada evapotranspiração.

Normalmente se estima a evapotranspiração devido à dificuldade de se separar os processos de evaporação - perda de água diretamente das superfícies

para a atmosfera - e transpiração - perda de água dos organismos vegetais e animais para a atmosfera.

A evapotranspiração é considerada como potencial quando ocorre a partir de uma superfície vegetada extensa e uniforme, coberta por vegetação de porte baixo e bem suprida de água.

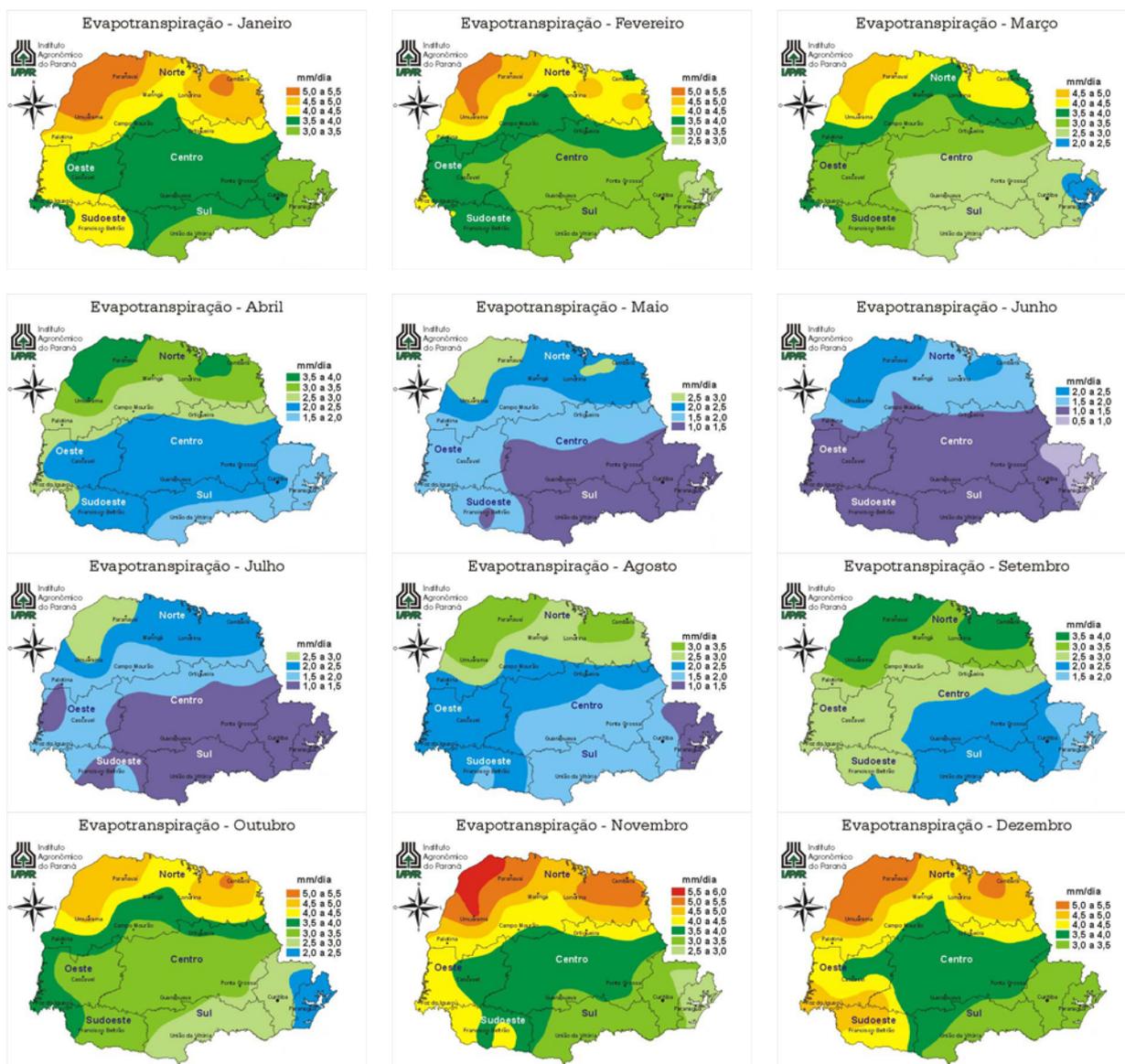


Figura 21 - Cartas com as médias mensais de evapotranspiração.
Fonte: MODIFICADO DE IAPAR (2000)

Carvalho e Stipp (2004) em uma análise global do comportamento termopluiométrico no estado do Paraná, evidenciaram uma distinção mais marcante no que se refere à pluviometria, representada por uma estação mais chuvosa e

outra mais seca, diferenciando-se das variações térmicas sazonais menos acentuadas.

Com relação ao Balanço Hídrico do Estado do Paraná propriamente dito, observam-se valores médios anuais de excedente hídrico (EXC) entre 372,8mm (Cambará) e 1586,7mm (Antonina).

A média mensal de precipitações é sempre superior a 100mm, exceto pela cidade de Maringá, 99,3mm. A deficiência hídrica (DEF) é presente em apenas 10 municípios, com valores médios anuais variando entre 0,1mm a 2,7mm (Carvalho e Stipp,2004).

Próximos a Marechal Cândido Rondon, os municípios de Foz do Iguaçu, São Miguel do Iguaçu, Cascavel e Guaíra apresentam ao longo de sua série histórica, balanço hídrico positivo, com excedentes hídricos maiores que 798mm / ano, conforme Carvalho e Stipp, 2004.

Estes dados mostram as condições do regime hídrico regional, caracterizando, no estado do Paraná (e na BPIII) o predomínio de excedentes hídricos ao longo de sua série histórica de dados.

3.1.4.1 Balanço hídrico climatológico da bacia do rio Ajuricaba, Marechal Cândido Rondon / PR.

O estudo sobre a interação entre os recursos hídricos superficiais e subterrâneos aborda aspectos climáticos, hidrológicos e hidrogeológicos, entre outros, com o intuito de caracterizar o ciclo hidrológico em uma determinada região ou bacia hidrográfica, quantificando e qualificando os recursos hídricos deste local.

Em um contexto regional, a baía do rio Ajuricaba localiza-se na Bacia Hidrográfica do Rio Paraná III (BPIII). A bacia hidrográfica do rio Ajuricaba está situada no município de MCR e sua localização, no contexto da BPIII é apresentada na Figura 22.

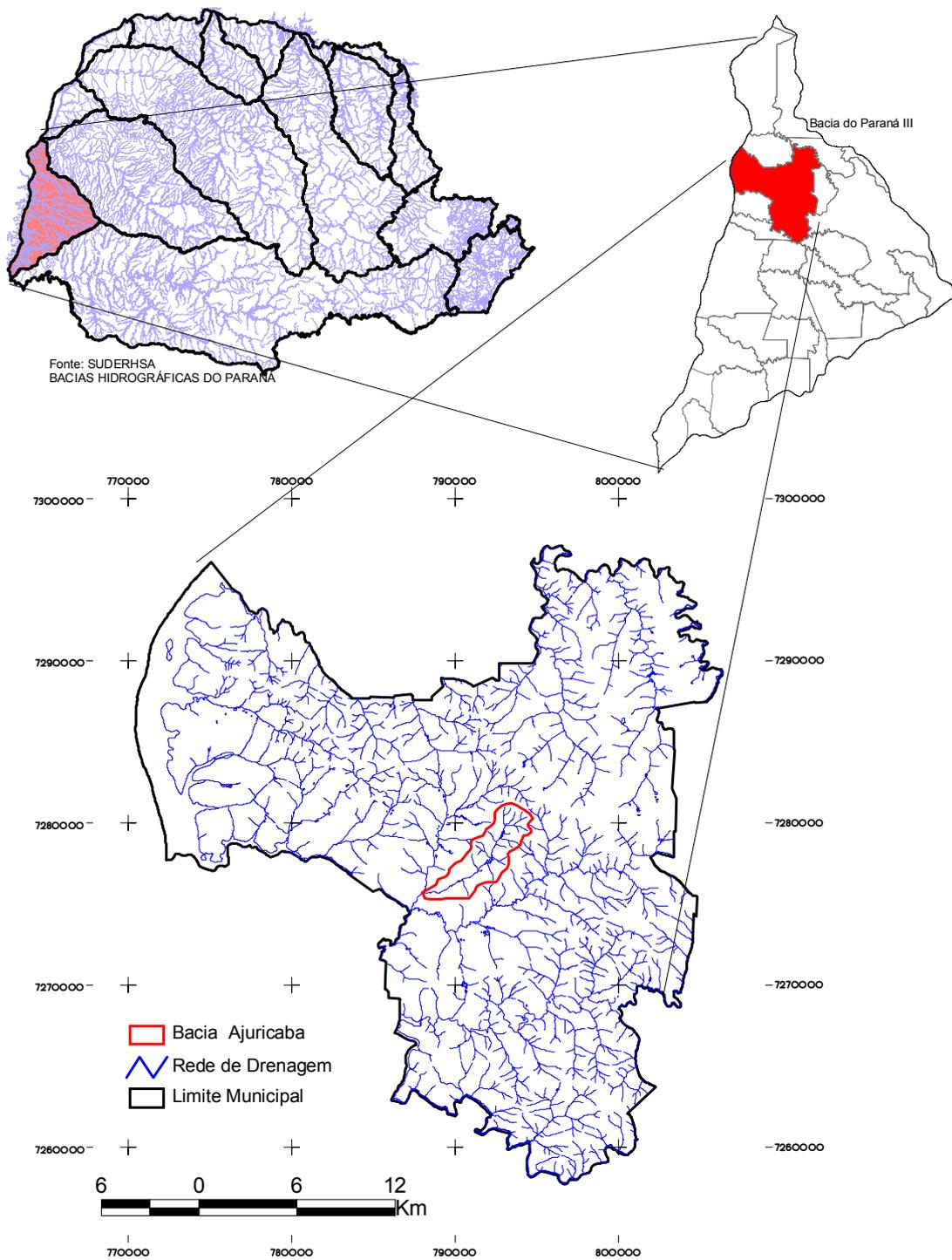


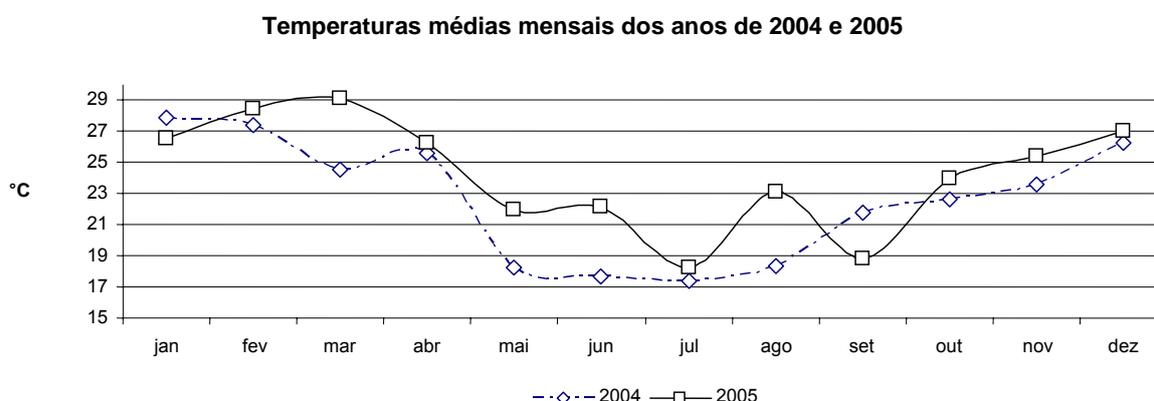
Figura 22 - Localização do município de Marechal Cândido Rondon e da bacia do Ajuricaba.

3.1.4.1.1 Parâmetros analisados

- Temperatura do Ar

Tomando como base as médias mensais de temperatura do ar, no período entre janeiro de 2004 a dezembro de 2005, a temperatura média anual é 23,4 °C, o mês mais quente, março de 2005 com temperatura média de 29,2 °C e, o mês mais frio, Julho de 2005 com temperatura média de 17,4 °C (Figura 23).

Exceto os meses de janeiro e setembro, todos os outros meses de 2005 possuem temperaturas médias maiores que as registradas no ano de 2004.



	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2004	27,3	27,4	24,5	25,6	18,3	17,7	17,4	18,3	21,8	22,6	23,6	26,3
2005	26,6	28,5	29,2	26,3	22,0	22,2	18,3	23,1	18,8	24,0	25,4	27,0

Figura 23 - Gráfico comparativo entre as Temperaturas médias mensais dos anos de 2004 e 2005

- Precipitação pluviométrica

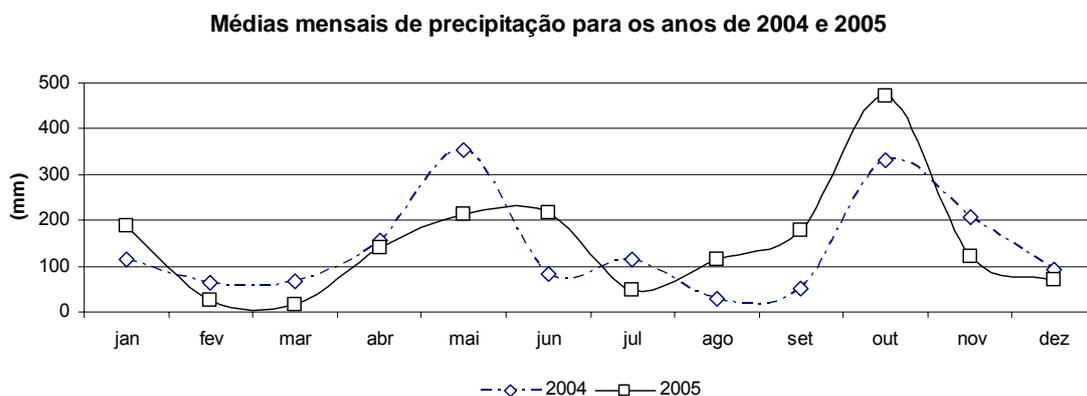
A precipitação anual média no período de janeiro / 2004 a dezembro / 2005 é de 1735mm.

A média mensal de precipitação é de 144mm, sendo outubro / 2005 o mês mais chuvoso com volume precipitado de 470mm e, março / 2005 o mês com menor precipitação, 16mm.

Os valores acumulados de precipitação para os anos de 2004 e 2005 são 1664mm e 1806mm respectivamente.

No período analisado, os trimestres: abril, maio, junho e setembro, outubro, novembro, apresentaram maior precipitação. Este fato difere do padrão histórico observado por IAPAR (2000) e Carvalho e Stipp (2004), onde nos meses de

dezembro, janeiro e fevereiro concentram-se os maiores índices pluviométricos na região. Comparando os meses do período estudado; janeiro, junho, agosto, setembro e outubro de 2005 apresentam volumes precipitados maiores que no ano de 2004 (Figura 24).



	Jan	Fev	Mar	Abril	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2004	114	63	67	156	355	84	115	28	52	330	207	93
2005	189	26	16	141	213	218	49	115	178	470	121	70

Figura 24 - Gráfico comparativo entre as precipitações mensais para o período analisado.

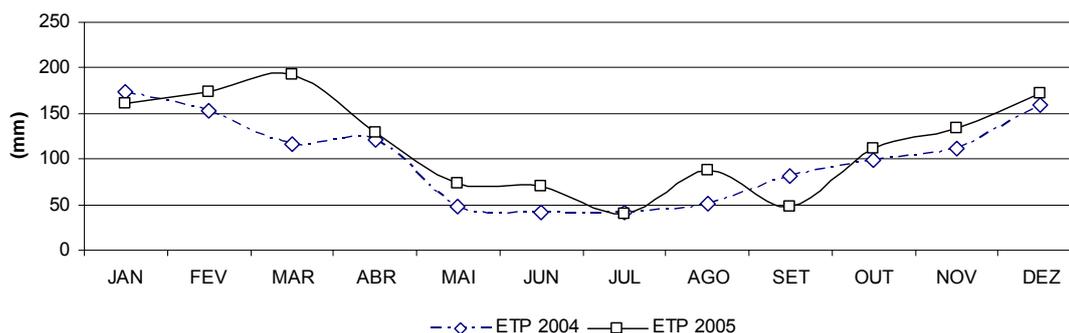
- Evapotranspiração Potencial

Tomando como base os valores mensais de evapotranspiração potencial (ETP), no período entre janeiro de 2004 a dezembro de 2005, a ETP média é 107,8 mm; o mês com maior ETR é janeiro de 2004 com 173 mm e julho de 2005 o mês com menor valor 40mm.

Janeiro, julho e setembro / 2004 apresentam evapotranspiração potencial maior em 2004 do que em 2005, em todos os outros meses o ano de 2005 possui valores mais elevados (Figura 25).

A ETP do período analisado apresenta-se concordante com os valores estaduais, caracterizando o verão como a estação com maiores ETP, em virtude do maior comprimento dos dias e, da maior incidência de radiação solar.

Evapotranspiração Potencial



	Jan	Fev	Mar	Abril	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2004	173,5	152,1	117,0	120,3	47,8	41,3	41,8	50,5	81,3	98,9	111,4	158,9
2005	161,5	173,0	193,0	128,3	72,6	70,0	40,4	88,1	47,6	110,7	133,5	172,5

Figura 25- Gráfico comparativo entre a evapotranspiração potencial nos anos de 2004 e 2005.

- **Escoamento Superficial**

Neste trabalho, foram utilizadas as medições de vazão realizadas no rio Ajuricaba, no período entre dezembro de 2004 e dezembro de 2005.

As medições do escoamento superficial eram realizadas a cada 01 hora e medidas em m³/s na estação localizada no rio Ajuricaba.

O escoamento médio mensal, no período estudado, calculado a partir de informações horárias, é 0,3 m³/s, o que representa uma lâmina d'água de 51 mm mensais sobre a bacia hidrográfica (16,4 km²).

O mês com maior ESC foi outubro de 2005 com 1,1 m³/s (182,5 mm) e os meses de março e abril de 2004 com menor escoamento superficial 0,04 m³/s (6,7 mm).

A Tabela 3 apresenta a média mensal do escoamento superficial obtida na estação localizada no rio Ajuricaba para o período de dezembro de 2004 a dezembro de 2005.

Tabela 3 - médias mensais do escoamento superficial.

MÊS	ESC (m ³ /s)	ESC (mm)	MÊS	ESC (m ³ /s)	ESC (mm)
Dez/04	0,290	48,5	Jul/05	0,160	26,8
Jan/05	0,170	28,5	Ago/05	0,110	18,4
Fev/05	0,060	10,0	Set/05	0,260	43,5
Mar/05	0,040	6,7	Out/05	1,090	182,5
Abr/05	0,040	6,7	Nov/05	0,820	137,3
Mai/05	0,100	16,7	Dez/05	0,330	55,2
Jun/05	0,480	80,4	-	-	-

3.1.4.1.2 O Balanço Hídrico Climatológico

A diferença entre os valores mensais acumulados de precipitação (P), e a soma do escoamento superficial (ESC) com os valores mensais de evapotranspiração (ETP), se positivo ($P > ESC + ETP$) caracteriza um volume de água (Saldo Hídrico), disponível à infiltração e ao armazenamento de água na bacia, aqui denominado excedente hídrico ou, se negativo ($P < ESC + ETP$), uma deficiência hídrica.

A média mensal precipitada no período entre dezembro de 2004 e dezembro de 2005 é 146,1 mm. A soma das precipitações mensais para o período estudado (13 meses) é 1899 mm.

A média mensal da ETP no período entre dezembro / 2004 e dezembro / 2005 é 119 mm. O somatório da evapotranspiração potencial mensal para o período estudado é 1550 mm.

A média mensal do escoamento superficial no período entre dezembro de 2004 e dezembro de 2005 é 50 mm. O somatório do escoamento superficial mensal para o período totaliza 661mm.

A Figura 26 - Gráfico dos valores mensais de precipitação, evapotranspiração potencial e escoamento superficial no período estudado. apresenta os valores mensais de precipitação, evapotranspiração potencial e escoamento superficial no período estudado.

Ao analisar os valores mensais do balanço hídrico (Tabela 4) observa-se que dentre os 13 meses analisados, seis meses apresentaram excedentes hídricos (abril, maio, junho, agosto, setembro e outubro).

Os excedentes hídricos possuem, no período estudado, valores entre 6 mm (abril / 2005) e 176 mm (outubro / 2005).

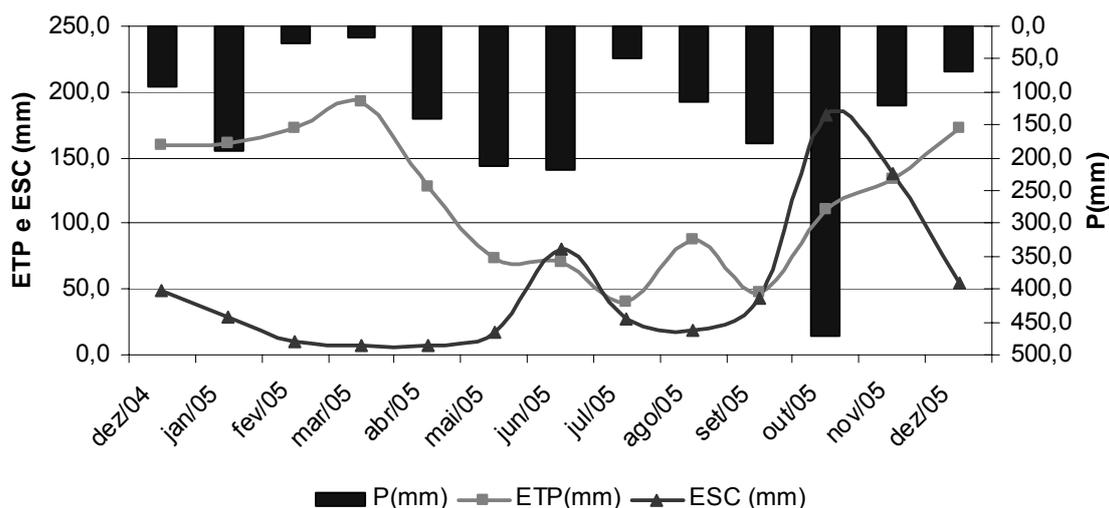


Figura 26 - Gráfico dos valores mensais de precipitação, evapotranspiração potencial e escoamento superficial no período estudado.

Tabela 4- valores médios mensais de precipitação, evapotranspiração potencial, escoamento superficial e o saldo para o período entre dezembro de 2004 e dezembro de 2005, notar em **negrito** os meses com excedente hídrico.

Mês	P(mm)	ETP(mm)	ESC (m ³ /s)	ESC (mm)	SALDO (mm)
dez/04	93,0	158,9	0,290	48,5	-114,5
jan/05	189,0	161,5	0,170	28,5	-1,0
fev/05	26,2	173,1	0,060	10,0	-156,9
mar/05	16,0	193,0	0,040	6,7	-183,7
Abr/05	141,0	128,3	0,040	6,7	6,0
Mai/05	213,0	72,6	0,100	16,7	123,7
jun/05	218,0	70,0	0,480	80,4	67,6
jul/05	49,0	40,4	0,160	26,8	-18,2
Ago/05	115,0	88,1	0,110	18,4	8,5
set/05	178,0	47,6	0,260	43,5	86,8
out/05	470,0	110,7	1,090	182,5	176,8
Nov/05	121,0	133,5	0,820	137,3	-149,8
dez/05	70,0	172,5	0,330	55,2	-157,8

Ao realizar o balanço hídrico climatológico acumulado para o período estudado, o resultado apresenta um déficit hídrico de 312,3mm.

A Figura 27 apresenta os valores acumulados de P, ETP, ESC e SALDO utilizados no cálculo do balanço hídrico climatológico no período de dezembro de 2004 e dezembro de 2005. Observa-se que neste período ocorreu um déficit hídrico, não existindo a possibilidade de recarga do aquífero.

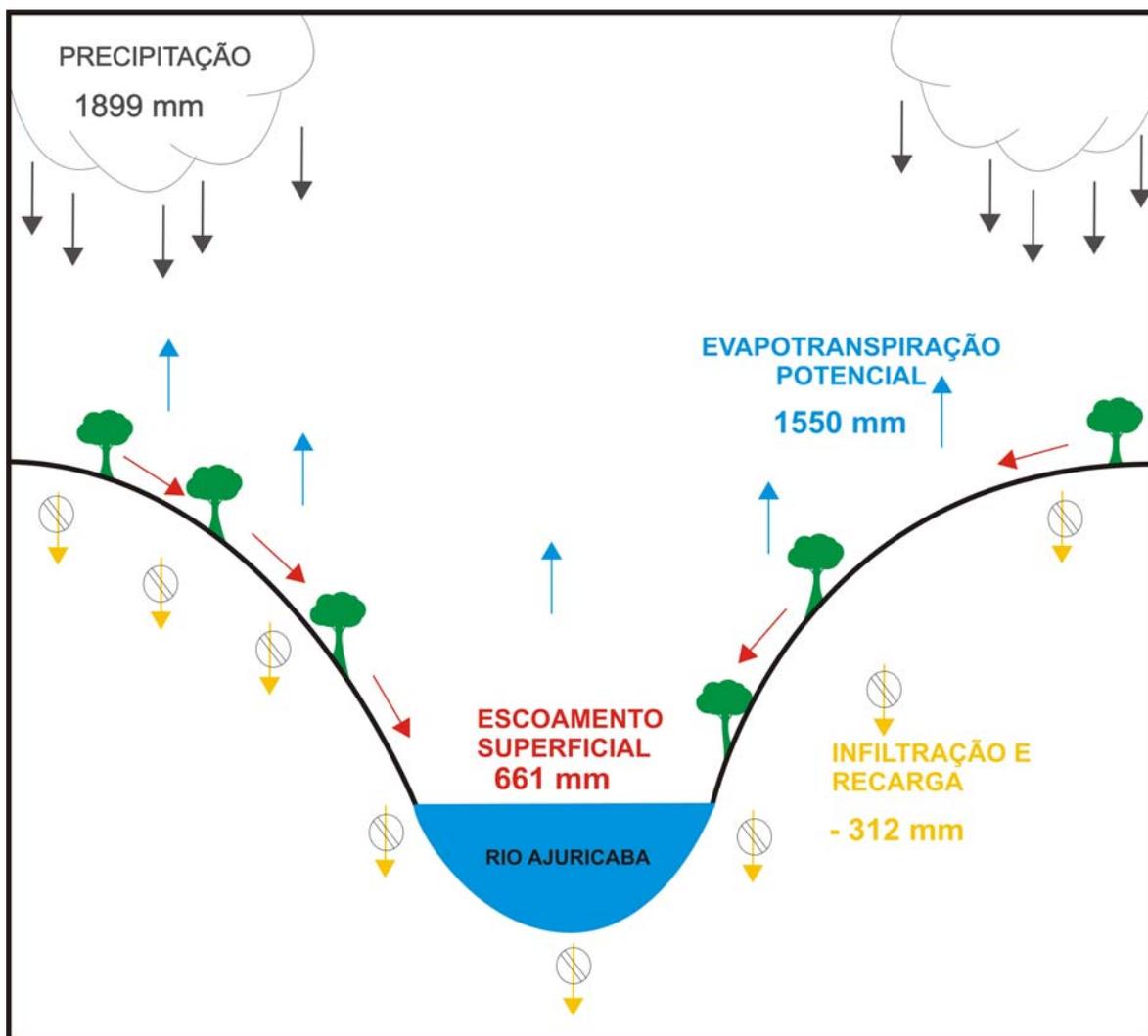


Figura 27 - Balanço hídrico climatológico para o período estudado.

3.1.4.1.3 Relações entre fenômenos climatológicos e águas subterrâneas

Frente ao período de estiagem observado, procurou-se caracterizar possíveis relações entre o déficit hídrico ocorrido e seus impactos nos recursos hídricos subterrâneos.

Para realizar esta análise foram utilizados os dados fornecidos pelo SAAE, correspondentes ao nível dinâmico (ND) de bombeamento do poço tubular profundo, denominado “Poço Líder”, poço distante 1,8 km da estação meteorológica do SAAE.

O “Poço Líder” é utilizado no abastecimento municipal, mantém sua vazão de bombeamento constante e mensalmente é medido o seu nível dinâmico de bombeamento.

O período analisado vai de janeiro de 2001 a abril de 2006 e o gráfico com a variação do ND neste período é apresentado na Figura 28.

Nesta comparação, o balanço hídrico climatológico compreendeu apenas os parâmetros precipitação e evapotranspiração. O descarte do escoamento superficial, nesta correlação, objetiva abranger um período maior de análise, entre janeiro de 2004 e dezembro de 2005.

Ao comparar o saldo do balanço hídrico climatológico, com os dados do nível dinâmico do poço tubular profundo pode-se constatar a relação da estiagem prolongada com o rebaixamento do nível de bombeamento, salientando-se que a vazão de exploração é mantida constante em todo o período estudado.

Esta relação evidencia também o acentuado rebaixamento do aquífero frente à ausência de recarga. Devem ser realizados estudos específicos para mensurar a velocidade de recarga das águas, bem como monitoramento do aquífero através de poços sem bombeamento.

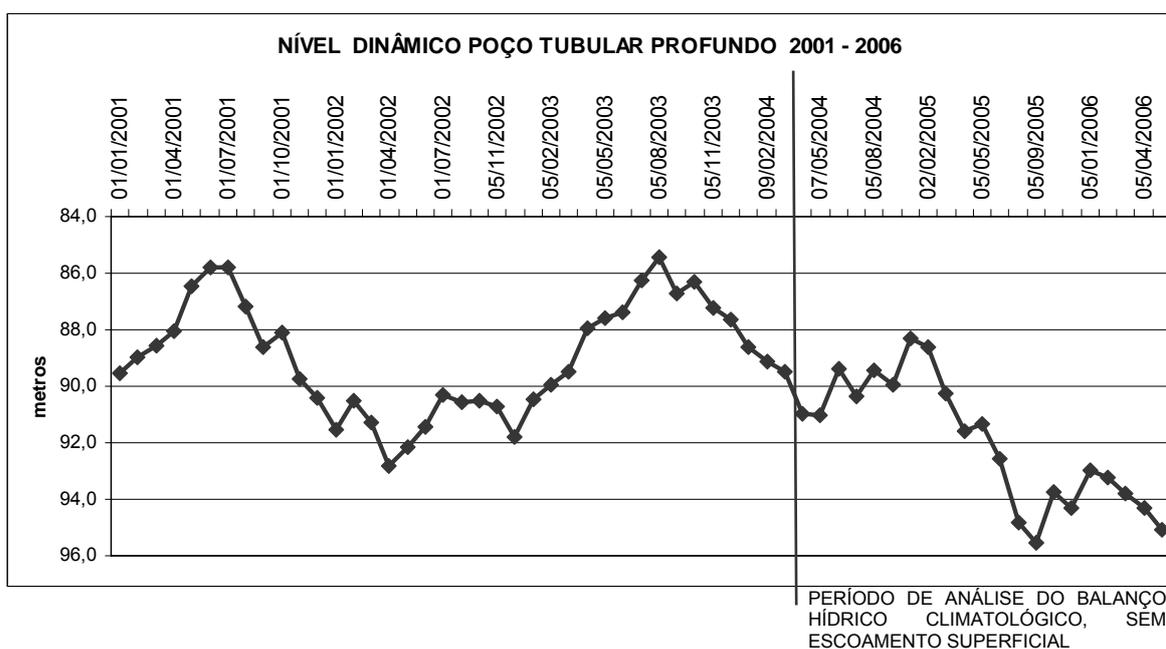


Figura 28 - Gráfico da variação do nível dinâmico no poço tubular profundo.

O balanço hídrico registrou precipitação média mensal de 146mm, evapotranspiração potencial média mensal de 119mm e escoamento superficial médio mensal de 51mm.

A estiagem caracterizada (2004 – 2005), repercutida intensamente na mídia devido a “quebra” da safra agrícola e prejuízos da ordem de milhões de

reais, influenciou também a captação de água para abastecimento público no poço do SAAE, devido ao rebaixamento do nível dinâmico ocorrido no poço tubular profundo.

Quando comparados os dados registrados na estação do SAAE com os boletins climanalise obtidos mensalmente no Centro de Previsão de Tempos e Estudos Climáticos – CPTEC (2007), observa-se que em todo o sul do Brasil registraram-se as mesmas deficiências hídricas e estiagens prolongadas determinadas em Marechal Cândido Rondon.

Cabe ressaltar que esta estiagem representa um fenômeno atípico aos padrões climatológicos do Estado do Paraná, bem como apresenta pouco valor estatístico por trata-se da análise de uma série histórica de no máximo 24 meses.

3.1. Geomorfologia da BPIII

Para caracterizar regionalmente aspectos geomorfológicos da área, serão apresentados três mapas temáticos: mapa hipsométrico, mapa da declividade do terreno e mapa das direções das vertentes.

A variação altimétrica na área em estudo é 600 metros. A cota altimétrica mais baixa é 86 m.s.n.m.; junto ao rio Paraná, após o reservatório de ITAIPU, e os terrenos mais elevados (até 768 m.s.n.m.) situam-se próximo ao município de Cascavel / PR. O mapa hipsométrico da BPIII é apresentado na Figura 32.

As porções mais baixias da BPIII, próximo a Calha do rio Paraná, são correspondentes a área de descarga regional do ASG (e também do Aquífero Botucatu).

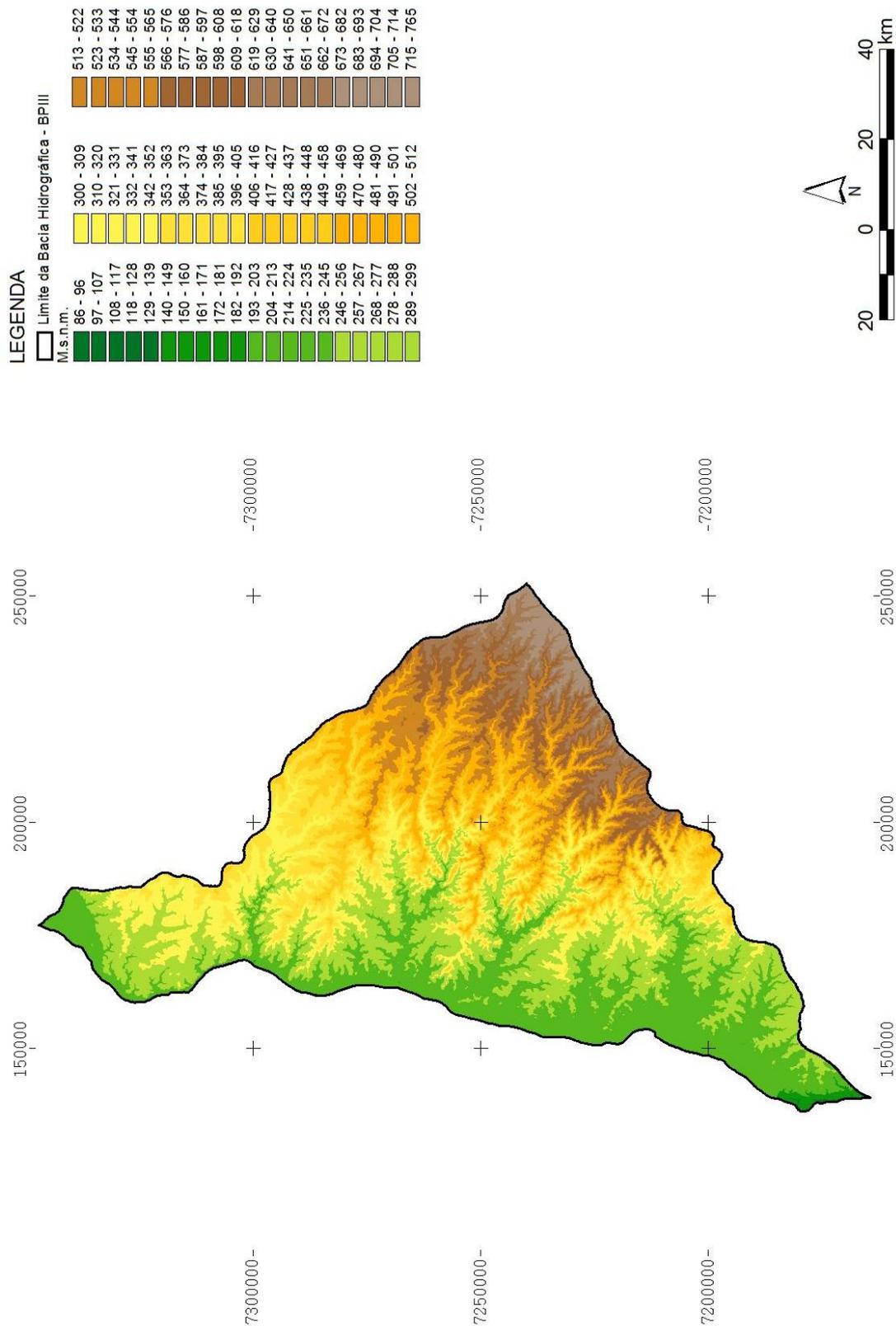


Figura 29 – Mapa hipsométrico da Bacia Hidrográfica do Paraná III.

Predominam terrenos com declividade média de 4° na área da BPIII (Figura 33). Áreas mais declivosas (maiores que 45°) ocorrem principalmente na porção central da bacia hidrográfica. Ressalta-se que em terrenos com declividade acima de 6% predomina o escoamento superficial, e em terrenos com declividades menores de 6% predomina a infiltração de água no solo.

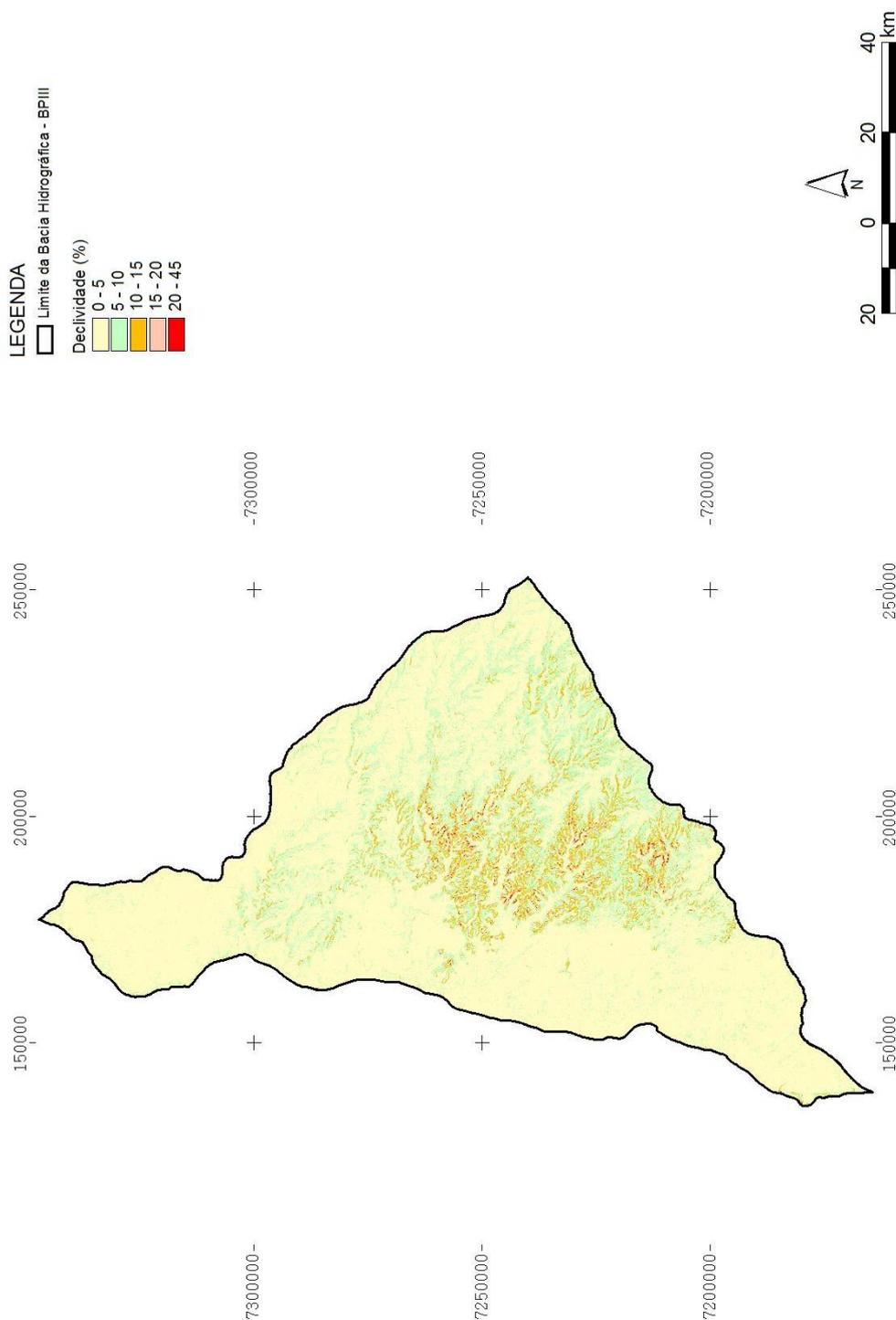


Figura 30 – Mapa da declividade do terreno na Bacia Hidrográfica do Paraná III.

O mapa de direção das vertentes tem sua função na hidrogeologia aplicada a determinação de encostas com menor insolação (voltadas para o sul), e conseqüentemente, maior umidade no solo, o que propicia melhores condições de recarga dos aquíferos. A Figura 31 apresenta o mapa de direção das vertentes na BPIII.

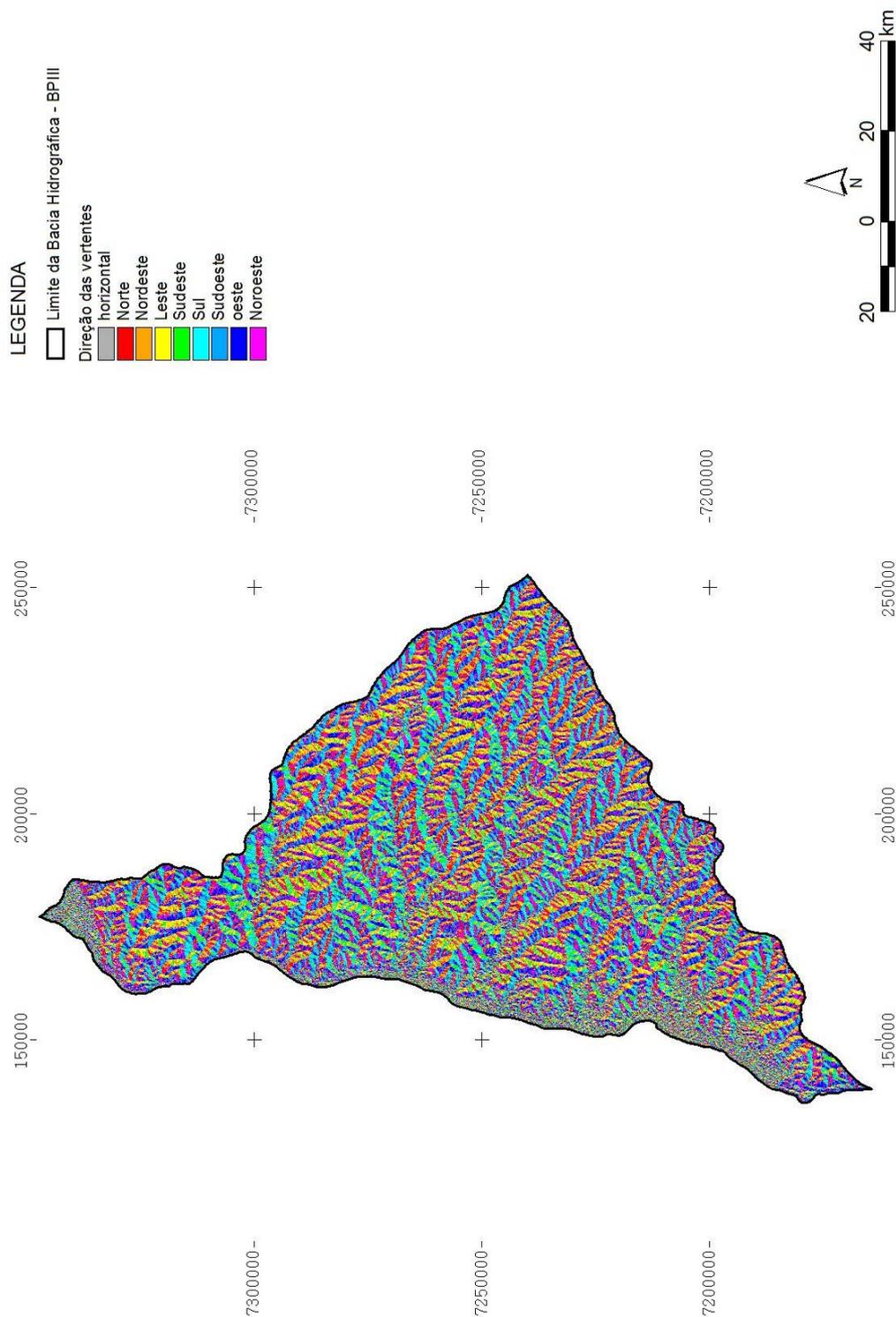


Figura 31 – Mapa da direção das vertentes na Bacia Hidrográfica do Paraná III.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise Multi-escala de Lineamentos Estruturais

A análise multi-escala de lineamentos consiste da descrição e interpretação de modelos digitais de elevação (Figura 32) e imagens orbitais Landsat TM7 visando determinar as direções estruturais predominantes.

Foram traçados inicialmente os lineamentos de toda área de estudo, a partir de 3 diferentes escalas de *zoom*: 1:600.000, 1:300.000 e 1:100.000. Em cada escala, foram caracterizadas as principais direções azimutais dos lineamentos estruturais, comparando os resultados obtidos (direções predominantes) para cada escala de análise.

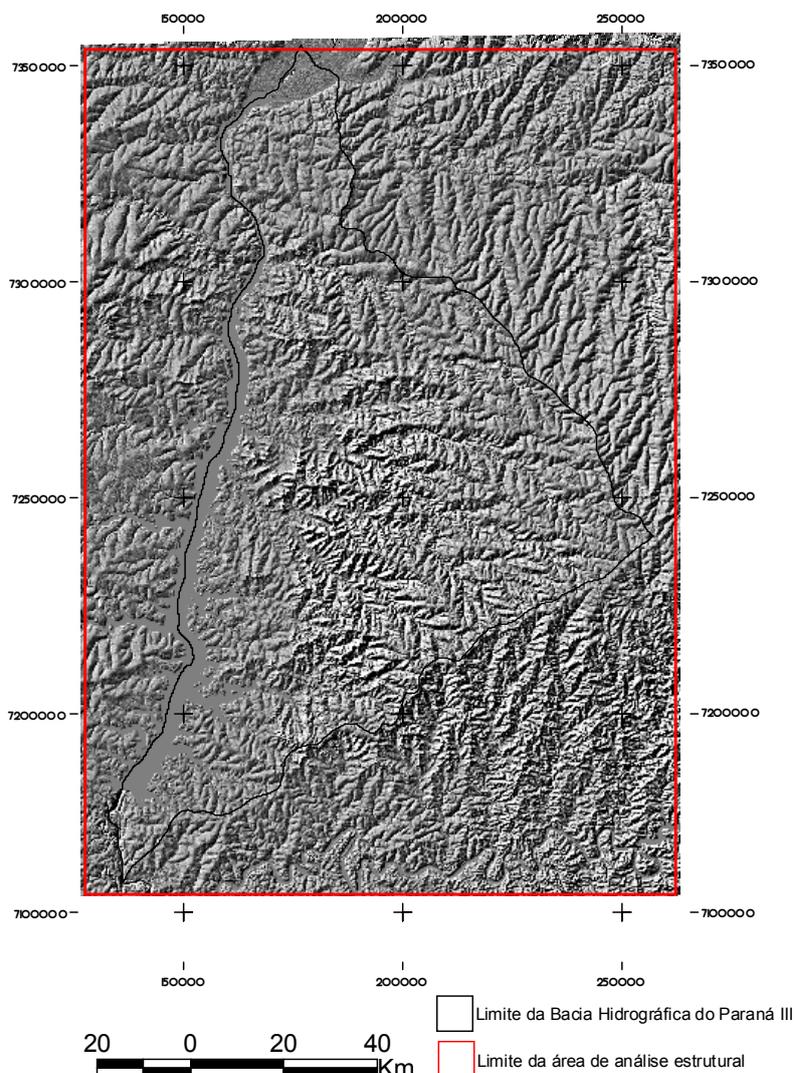


Figura 32 - Modelo Digital de Elevação SRTM90 (USGS, 2005)

4.1.1 Análise Direcional Multi-escala

4.1.1.1 Lineamentos 1:600.000

Utilizando a escala 1:600.000 foram traçados 165 lineamentos. Estes lineamentos foram divididos, conforme sua orientação, em classes azimutais de 10 graus de intervalo.

Frente ao comprimento destas estruturas, estas podem ser caracterizadas como alinhamentos estruturais, indicativos de zonas de cisalhamento, falhas, dentre outros.

A Tabela 5 apresenta os dados de frequência e comprimento dos lineamentos traçados.

Tabela 5 - Frequência e comprimento acumulado dos lineamentos na escala 1:600.000

Classes Azimutais	FREQUÊNCIA		COMPRIMENTO ACUMULADO	
	Número de Lineamentos	Porcentagem %	Comprimento dos Lineamentos	Porcentagem %
N90°W a N80°W	8	4,8	203.570	6,6
N80°W a N70°W	6	3,8	98.525	3,2
N70°W a N60°W	22	13,5	450.440	14,8
N60°W a N50°W	11	6,6	222.718	7,2
N50°W a N40°W	3	1,8	66.688	2,1
N40°W a N30°W	1	0,7	9.828	0,3
N30°W a N20°W	2	1,4	22.547	0,8
N20°W a N10°W	4	2,4	55.561	1,8
N10°W a N0°	8	4,8	151.952	5,1
N0° a N10°E	11	6,6	172.055	5,6
N10°E a N20°E	14	8,4	210.741	6,8
N20°E a N30°E	14	8,4	319.595	10,4
N30°E a N40°E	14	8,4	217.673	7,1
N40°E a N50E	17	10,3	318.664	10,4
N50°E a N60°E	10	6	169.187	5,5
N60°E a N70°E	11	6,6	224.921	7,3
N70°E a N80°E	1	0,7	23.990	0,9
N80°E a N90°E	8	4,8	125.858	4,1

Os lineamentos podem ser visualizados nos diagramas de rosetas, nas classes de comprimento e frequência na Figura 33.

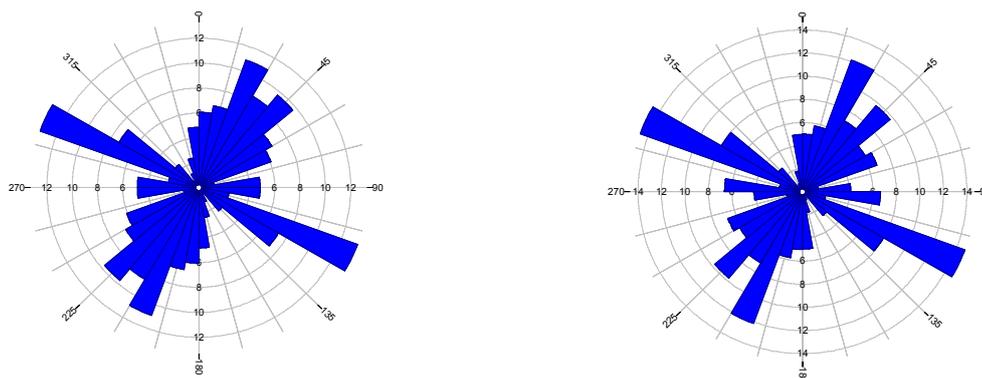


Figura 33 - Diagrama de rosetas para os lineamentos traçados na escala 1:600.000, à esquerda roseta referente a freqüência, à direita roseta do comprimento acumulado dos lineamentos

Ao analisar as classes azimutais da distribuição da freqüência dos lineamentos na escala 1:600.000, observa-se que predominam os lineamentos de direção N70°W a N60°W (13,5%), seguidos pelos lineamentos de direção N40°E a N50°E (10,3%).

O predomínio da direção NW (noroeste) junto aos lineamentos traçados nesta escala é evidenciado principalmente na direção das principais drenagens da Bacia do Paraná III (ex: Rio São Francisco Falso, Rio São Francisco Verdadeiro e Ocoí). Nestes casos a rede de drenagem é controlada pelos lineamentos estruturais em um padrão riacho-fenda de dissecação do relevo.

O mapa com os lineamentos traçados sobre modelo SRTM 90 (USGS, 2005), na escala 1:600.000, e as principais drenagens da Bacia do Paraná III está apresentado na Figura 34.

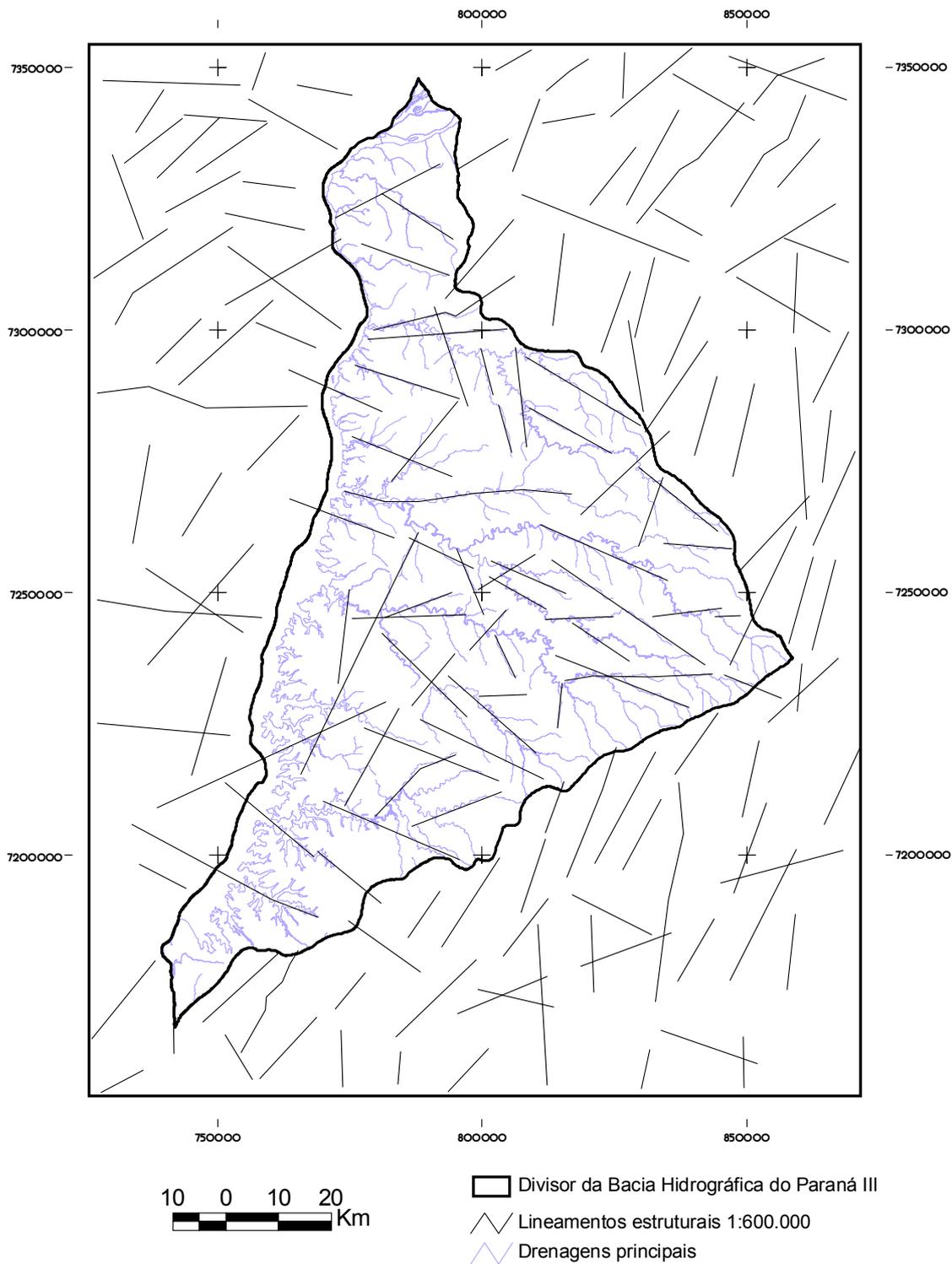


Figura 34 - Lineamentos traçados na escala 1:600.000

4.1.1.2 Lineamentos 1:300.000

Utilizando a escala 1:300.000 foram traçados 1.237 lineamentos. Estes lineamentos foram divididos, conforme sua orientação, em classes azimutais de 10° de intervalo. A Tabela 6 apresenta os dados de freqüência e comprimento acumulado dos lineamentos traçados.

Tabela 6 - Freqüência e comprimento acumulado dos lineamentos na escala 1:300.000

Classes Azimutais	FREQUÊNCIA		COMPRIMENTO ACUMULADO	
	Número de Lineamentos	Porcentagem %	Comprimento dos Lineamentos	Porcentagem %
N90°W a N80°W	35	2,8	152.574	2,8
N80°W a N70°W	47	3,7	232.757	4,3
N70°W a N60°W	97	7,8	454.082	8,4
N60°W a N50°W	67	5,4	278.690	5,1
N50°W a N40°W	62	5,1	250.475	4,6
N40°W a N30°W	62	5,1	256.121	4,7
N30°W a N20°W	60	4,8	237.490	4,4
N20°W a N10°W	72	5,8	288.303	5,3
N10°W a N0°	65	5,2	250.022	4,6
N0° a N10°E	108	8,7	451.275	8,4
N10°E a N20°E	114	9,2	498.751	9,2
N20°E a N30°E	101	8,1	449.657	8,3
N30°E a N40°E	94	7,5	385.995	7,2
N40°E a N50E	81	6,5	383.164	7,1
N50°E a N60°E	64	5,1	315.680	5,8
N60°E a N70°E	48	3,8	201.812	3,7
N70°E a N80°E	36	2,9	174.174	3,2
N80°E a N90°E	24	1,9	106.937	1,9

Os lineamentos podem ser visualizados nos diagramas de rosetas, nas classes de comprimento e freqüência na Figura 35.

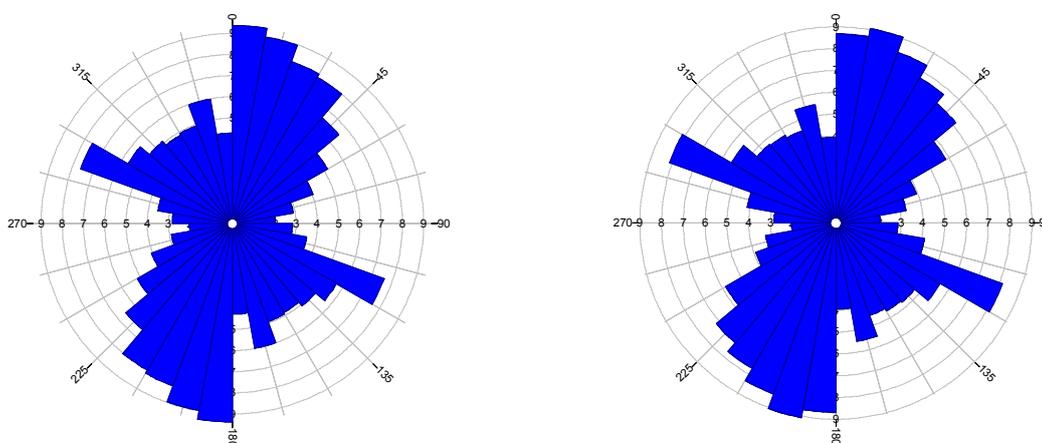


Figura 35 - Diagrama de rosetas para os lineamentos traçados na escala 1:300.000, à esquerda roseta referente a freqüência dos lineamentos à direita roseta referente ao comprimento acumulado.

Ao analisar as classes azimutais da distribuição da frequência dos lineamentos na escala 1:300.000, observa-se que predominam os lineamentos de direção N-S a N30°E (26% dos lineamentos estão neste intervalo). O principal intervalo de direção no quadrante noroeste foi N70° - 60°W, correspondente a 7,8% do total de lineamentos traçados.

Existe uma maior ocorrência dos lineamentos N-S nesta escala de traçado quando comparada a escala anterior. Observa-se também que as principais drenagens da BPIII estão controladas pelos lineamentos estruturais de direção NW. Entretanto, os lineamentos de direção NE e N-S correspondem, em sua maioria, aos canais secundários da rede de drenagem principal.

O mapa com os lineamentos traçados na escala 1:300.000 está apresentado na Figura 36.

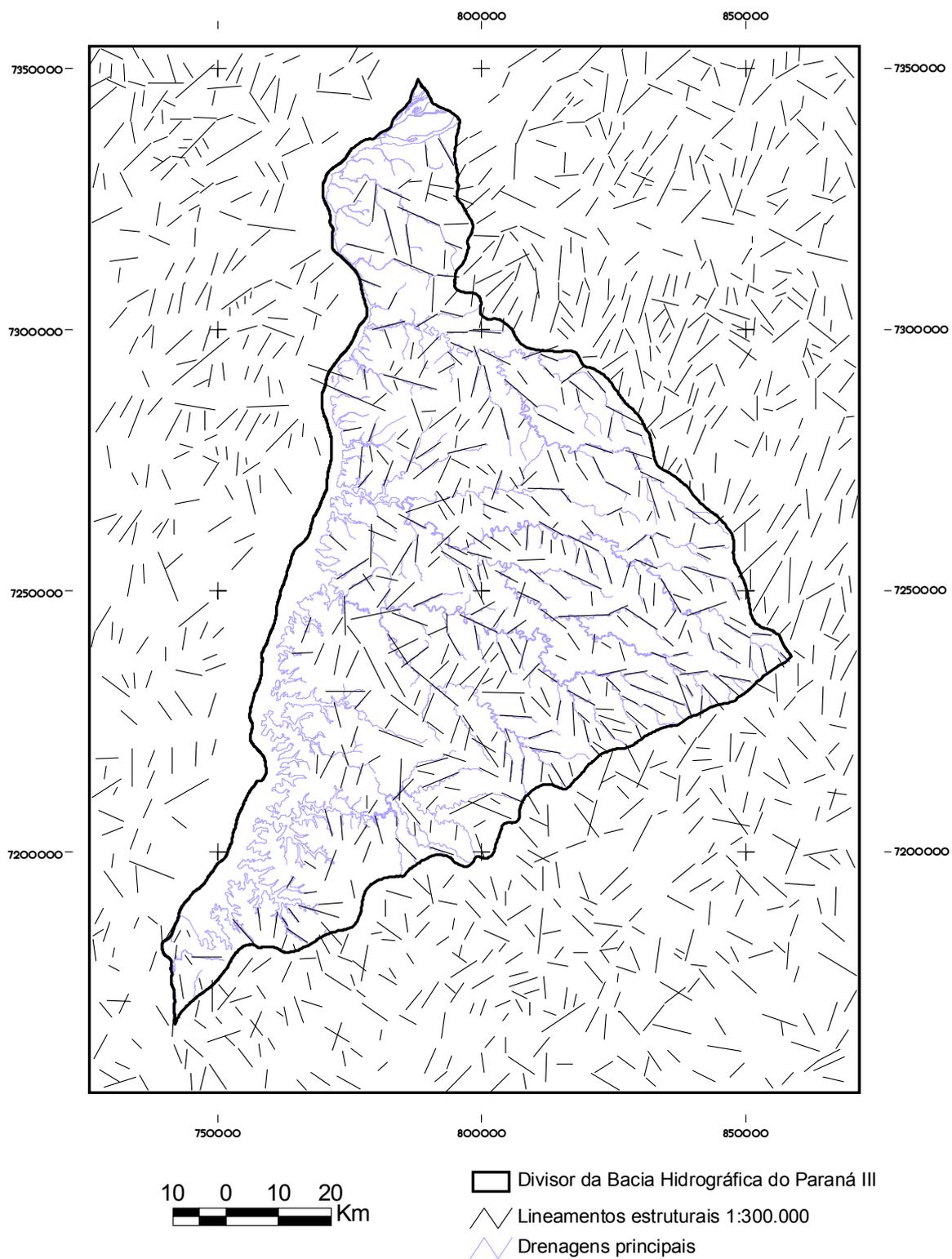


Figura 36 - Lineamentos traçados na escala 1:300.000

4.1.1.3 Lineamentos 1:100.000

Utilizando a escala 1:100.000 foram traçados 10.384 lineamentos. Estes lineamentos foram divididos, conforme sua orientação, em classes azimutais de 10° graus de intervalo. A Tabela 7 apresenta os dados de frequência e comprimento dos lineamentos traçados.

Tabela 7 - Frequência e comprimento dos lineamentos traçados na escala 1:100.000

Classes Azimutais	FREQUÊNCIA		COMPRIMENTO ACUMULADO	
	Número de Lineamentos	Porcentagem %	Comprimento dos Lineamentos	Porcentagem %
N90°W a N80°W	376	3,7	441.615	3,4
N80°W a N70°W	505	4,8	641.895	4,9
N70°W a N60°W	697	6,7	900.512	6,9
N60°W a N50°W	880	8,6	1.097.105	8,4
N50°W a N40°W	840	8,2	967.524	7,4
N40°W a N30°W	697	6,7	834.044	6,4
N30°W a N20°W	615	5,9	739.576	5,7
N20°W a N10°W	497	4,7	582.927	4,5
N10°W a N0°	607	5,8	715.497	5,5
N0° a N10°E	600	5,7	765.215	5,9
N10°E a N20°E	604	5,8	736.983	5,7
N20°E a N30°E	629	6,2	803.963	6,2
N30°E a N40°E	592	5,8	744.323	5,7
N40°E a N50E	598	5,7	794.876	6,1
N50°E a N60°E	560	5,4	732.781	5,6
N60°E a N70°E	431	4,1	586.115	4,5
N70°E a N80°E	301	2,8	396.146	3
N80°E a N90°E	355	3,4	456.525	3,5

A distribuição espacial dos lineamentos, nas classes de comprimento e frequência, pode ser visualizada nos diagramas de rosetas da Figura 37.

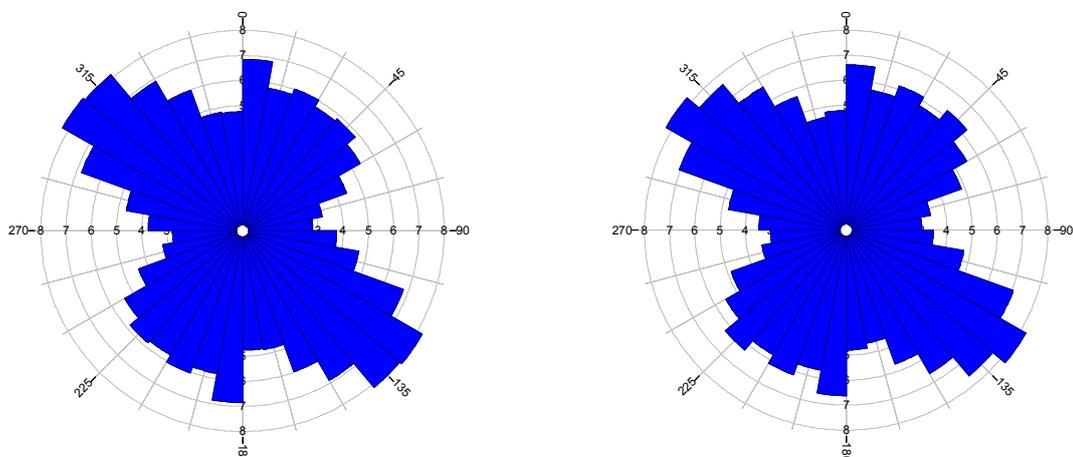


Figura 37 - Diagrama de rosetas para os lineamentos traçados na escala 1:100.000, à esquerda roseta referente a frequência dos lineamentos à direita roseta referente ao comprimento acumulado.

Ao analisar as classes azimutais da distribuição da frequência dos lineamentos na escala 1:100.000, observa-se que predominam os lineamentos de direção N60°W a N50°W (8,6%). A principal direção no quadrante nordeste foi N20° - 30°E, intervalo correspondente a 6,2% do total de lineamentos traçados.

Nesta escala de análise observa-se que a rede de drenagens está, em sua maior parte, controlada pelos lineamentos estruturais.

O mapa com os lineamentos traçados na escala 1:100.000 está apresentado na Figura 38.

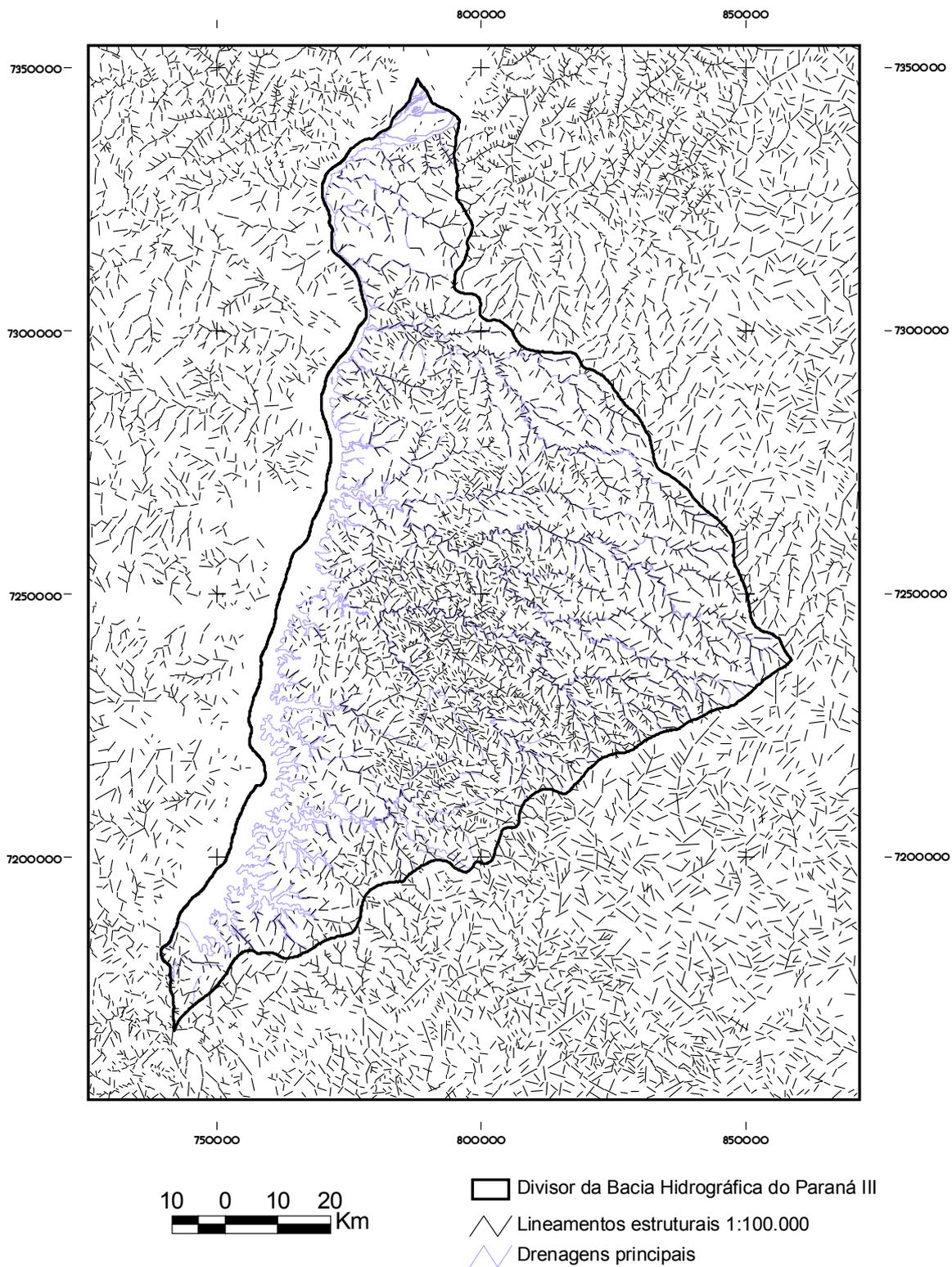


Figura 38 - Lineamentos traçados na escala 1:100.000

4.1.1 Análise comparativa dos lineamentos traçados

Com o objetivo de verificar para cada intervalo azimutal, em qual escala de análise este intervalo possui mais lineamentos traçados, foram comparados todos os resultados obtidos na análise direcional multi-escala de lineamentos (Figura 39).

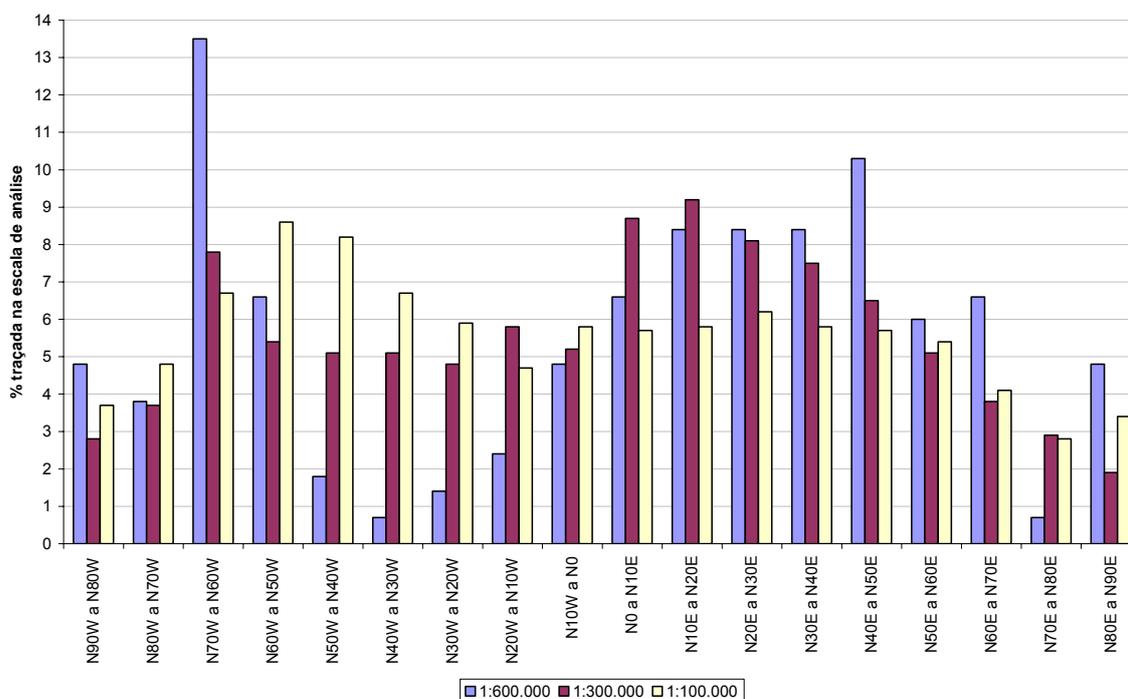


Figura 39 – Quadro comparativo dos lineamentos traçados nas escalas de análise.

Na escala 1:600.000 ainda que a direção N70W a N60W seja a com maior número de traçados, os lineamentos de direção NE predominam quando comparados nas outras escalas de análise. Estas grandes estruturas NE são, de maneira geral, paralelas as estruturas do embasamento da bacia sedimentar do Paraná.

Na escala 1:300.000 a distribuição por intervalos azimutais apresenta-se mais “homogênea” quando comparada a escala 1:600.000. Destacam-se as direções com tendência N-S, variando entre N20W a N20E.

Na escala 1:100.000 predominam os traçados com direção NW (variando de N20W a N80W). Na BPIII a direção NW é característica a rede de drenagem, destacando os rios São Francisco Falso, São Francisco Verdadeiro, Ocof, dentre outros.

Destaca-se que os intervalos azimutais N90W a N70W; N10W a N-S e N50E a N60E apresentam porcentagens de traçado muito semelhantes em todas as escalas, com variação percentual entre elas de no máximo 2%.

4.1.2 Análise de Densidade dos Lineamentos Estruturais

Inicialmente, para seleção do raio de busca e grade, foram realizadas análises utilizando os seguintes espaçamentos de contagem: 1.000 (apenas para escala 1:100.000 em função de um maior detalhamento); 2.500; 5.000 e 10.000. Os melhores resultados foram obtidos com as seguintes combinações:

- 1:600.000: raio de busca e grade com 10.000 metros.
- 1:300.000: raio de busca e grade com 5.000 metros.
- 1:100.000: raio de busca e grade com 1.000 metros.

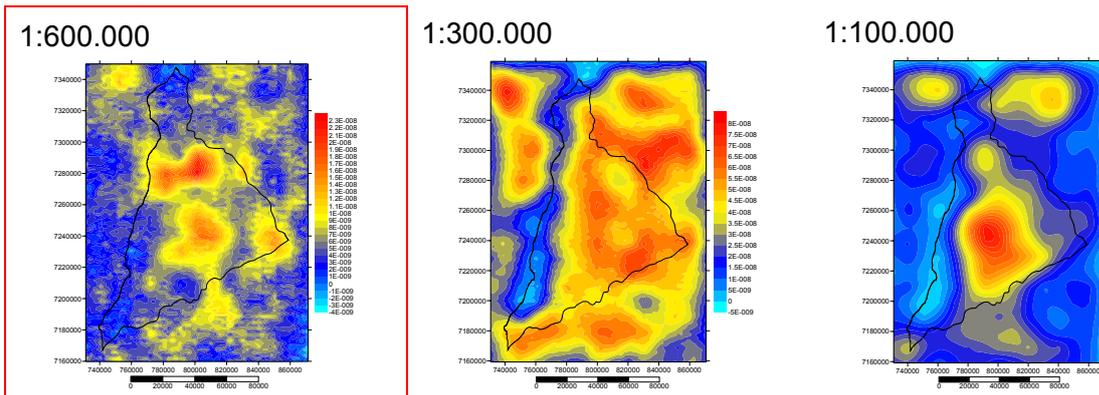
Foram realizadas diversas combinações de raios de busca, as melhores combinações entre escala de traçado, metragem do raio de busca e grade de análise, são sugeridas em vermelho na Figura 40.

A necessidade de distâncias menores no mapa de densidade de lineamentos 1:100.000 deve-se ao maior detalhamento deste, que quando analisado com a distância de 10.000 metros (como exemplo) perde a definição das áreas em função da grande densidade de lineamentos.

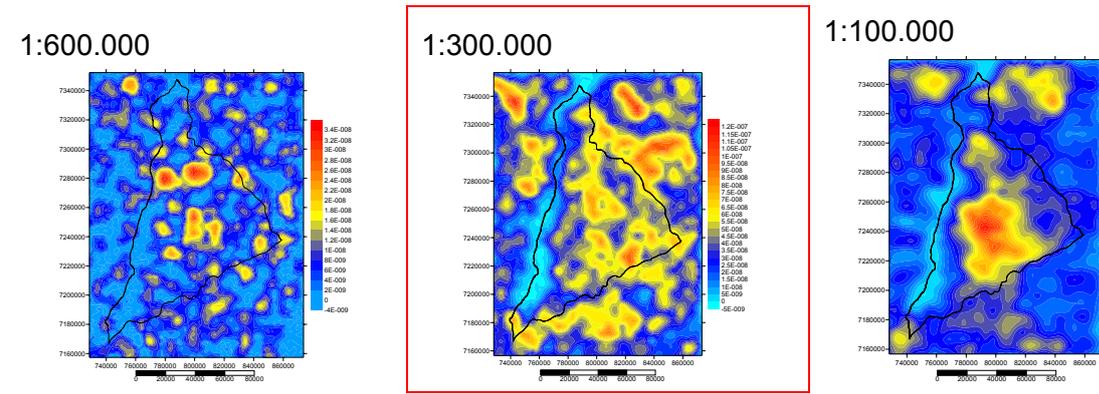
A partir do mapa de densidade total de lineamentos traçados em cada escala de análise, foram realizadas análises estatísticas com o programa *Linanalyst* (FREITAS, 2005) o qual utiliza um filtro direcional onde são tratados apenas os lineamentos da direção de interesse. Utilizando este procedimento foram gerados novos mapas de densidade de lineamentos para cada escala de análise, com enfoque nas principais direções obtidas na análise estrutural.

A seguir, de forma seqüencial, são apresentados os mapas específicos de cada escala de traçado. São apresentados três mapas para cada escala: na parte superior o mapa de densidade total de lineamentos traçados, na parte inferior a esquerda a direção azimutal predominante e, na porção inferior direita, a segunda direção azimutal em ocorrência, conforme os resultados da análise direcional realizada.

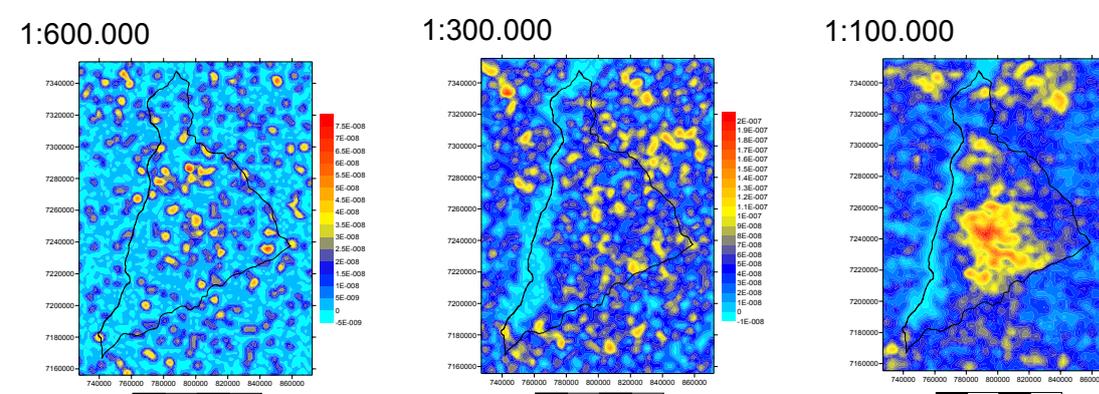
Grade e passo 10.000 metros



Grade e passo 5.000 metros



Grade e passo 2.500 metros



Grade e passo 1.000 metros

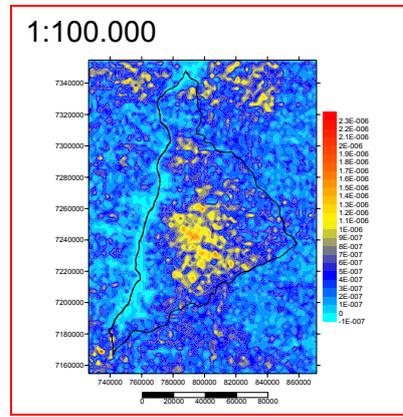
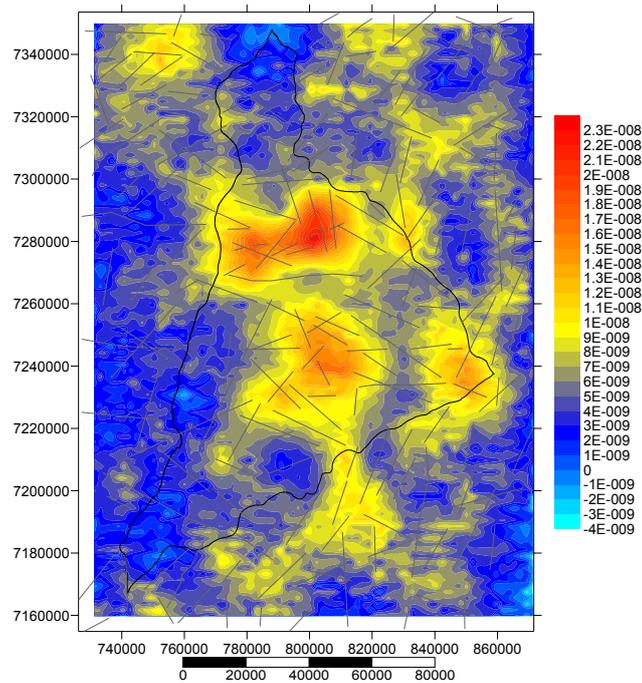


Figura 40 – Mapas com as diferentes metragens do raio de influência e grade.

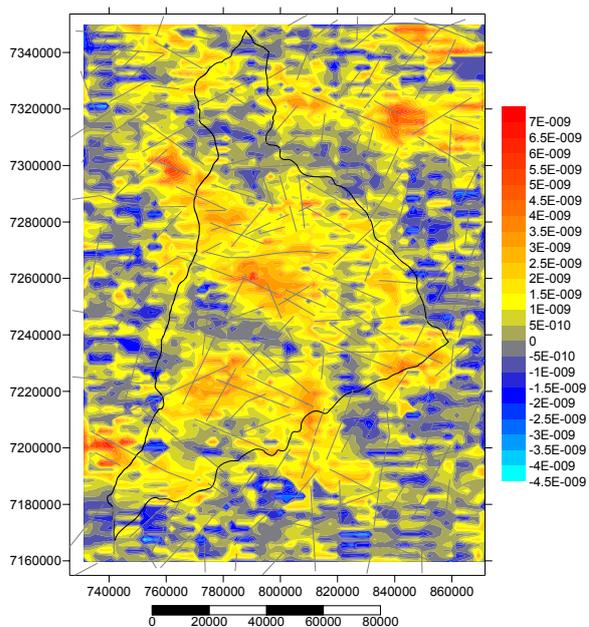
4.1.2.1 Análise da Densidade dos Lineamentos Estruturais 1:600.000

A Figura 41 apresenta o mapa de densidade dos lineamentos traçados na escala 1:600.000, bem como a densidade das principais direções azimutais encontradas: N70° – 60°W e N40 – 50E. O mapa de lineamentos é apresentado sobreposto (em cinza) aos mapas de densidade.

Densidade total



N 70° – 60° W



N 40° – 50° E

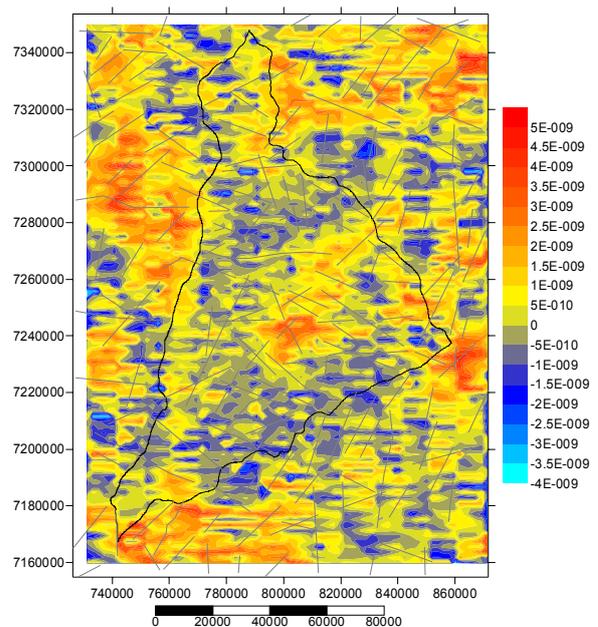
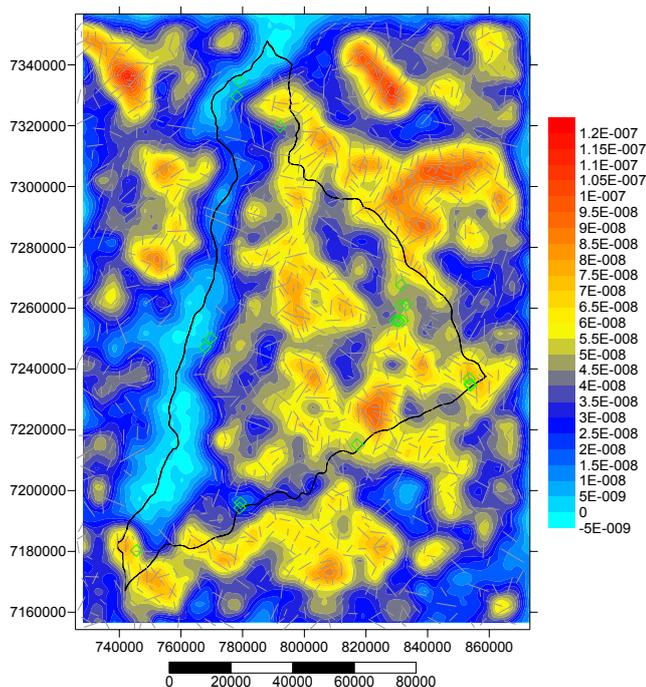


Figura 41 - Mapa de densidade dos lineamentos traçados na escala 1:600.000

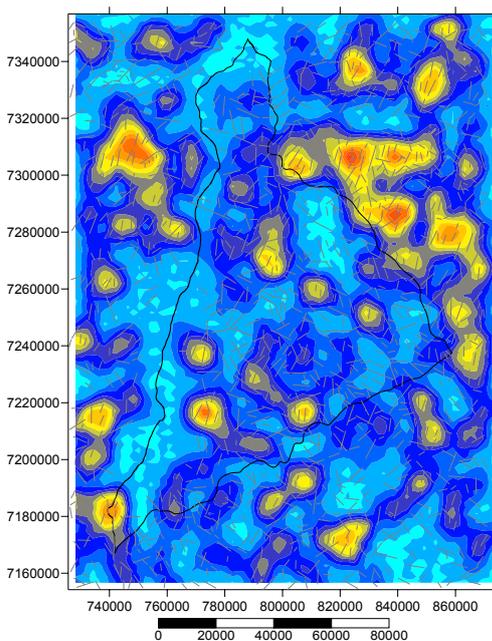
1.1.2.2 Análise da Densidade dos Lineamentos Estruturais 1:300.000

A Figura 42 apresenta o mapa de densidade dos lineamentos traçados na escala 1:300.000, bem como a densidade das principais direções azimutais encontradas: N0° – 30°E e N70° – 60°W. O mapa de lineamentos é apresentado sobreposto (em cinza) aos mapas de densidade.

Densidade total



N 0° – 30° E



N 70° – 60° W

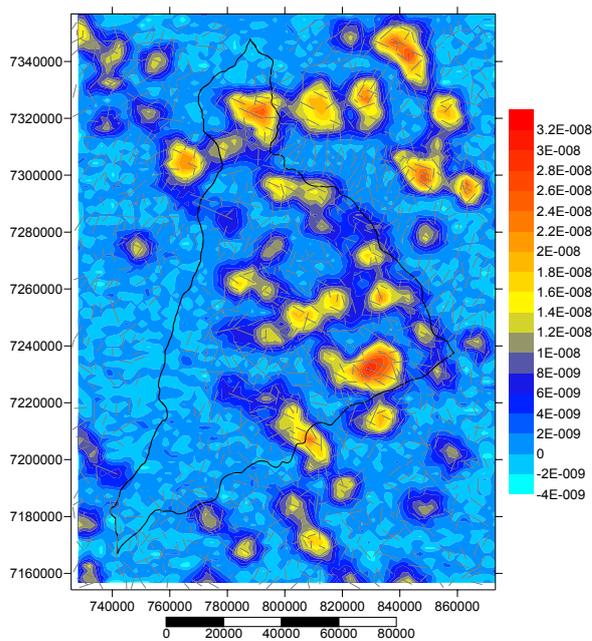
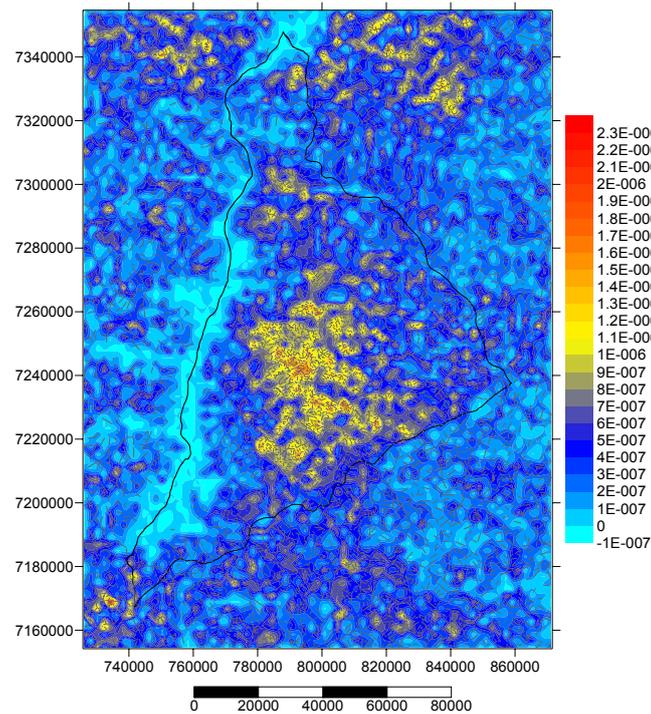


Figura 42 - Mapa de densidade dos lineamentos traçados na escala 1:300.000

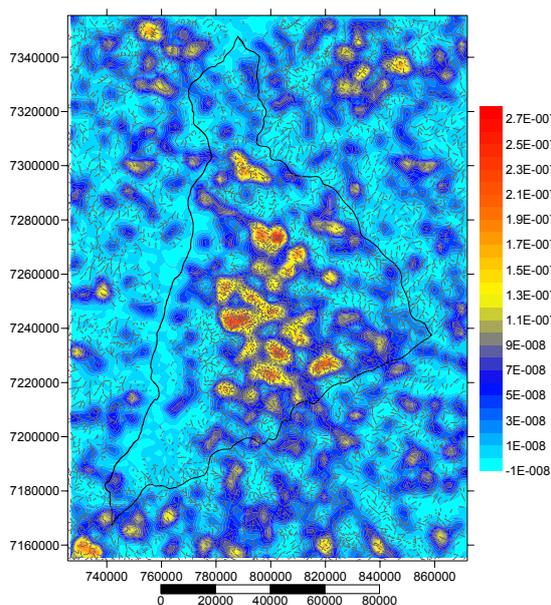
1.1.2.3 Análise da Densidade dos Lineamentos Estruturais 1:100.000

A Figura 43 apresenta o mapa de densidade dos lineamentos traçados na escala 1:100.000, bem como a densidade das principais direções azimutais encontradas: N60° – 50°W e N20 – 30E. O mapa de lineamentos é apresentado sobreposto (em cinza) aos mapas de densidade.

Densidade total



N 60° – 50° W



N 20° – 30° E

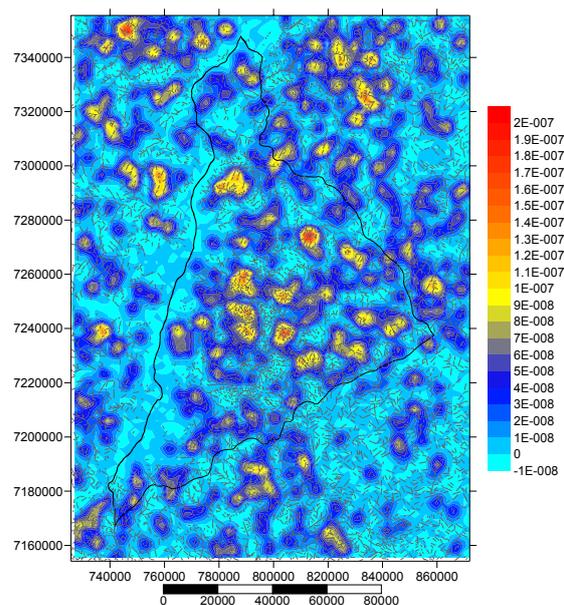


Figura 43 - Mapa de densidade dos lineamentos traçados na escala 1:100.000

4.2 Implicações do arcabouço estrutural nas vazões da BPIII

Com o objetivo de verificar a relação entre densidade de lineamentos traçados e localização de poços tubulares com vazões significativas (maior que o terceiro quartil) comparou-se os mapas de densidade ora apresentados com a localização dos poços tubulares existentes.

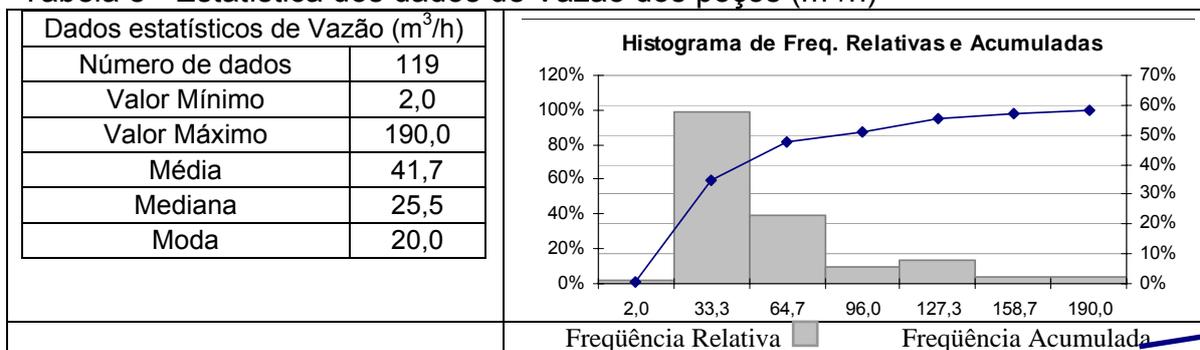
Os poços tubulares profundos foram separados segundo a distribuição do primeiro, segundo e terceiro quartis dos valores de vazão (5,25; 20 e 45 m³/h, respectivamente).

4.2.1 Distribuições das vazões na BPIII

Para a elaboração do mapa de vazões foram utilizados dados de 119 poços tubulares profundos, sendo 89 poços da SANEPAR e 30 poços do SAAE – serviço autônomo de água e esgoto de Marechal Cândido Rondon. A figura 38 apresenta a localização dos poços tubulares utilizados e figura 39, mapa de isovazões da BPIII.

A Tabela 8 apresenta os resultados estatísticos dos dados de vazão.

Tabela 8 - Estatística dos dados de Vazão dos poços (m³/h)



Na Figura 44 é apresentado o mapa com a indicação das vazões dos poços tubulares conforme a seguinte escala de cores: poços com vazões maiores que 45 m³/h em **lilas**, poços com vazão entre 20 e 45 m³/h representados por **estrelas pretas** e poços com vazões entre 5 e 25 m³/h em **circunferências negras**.

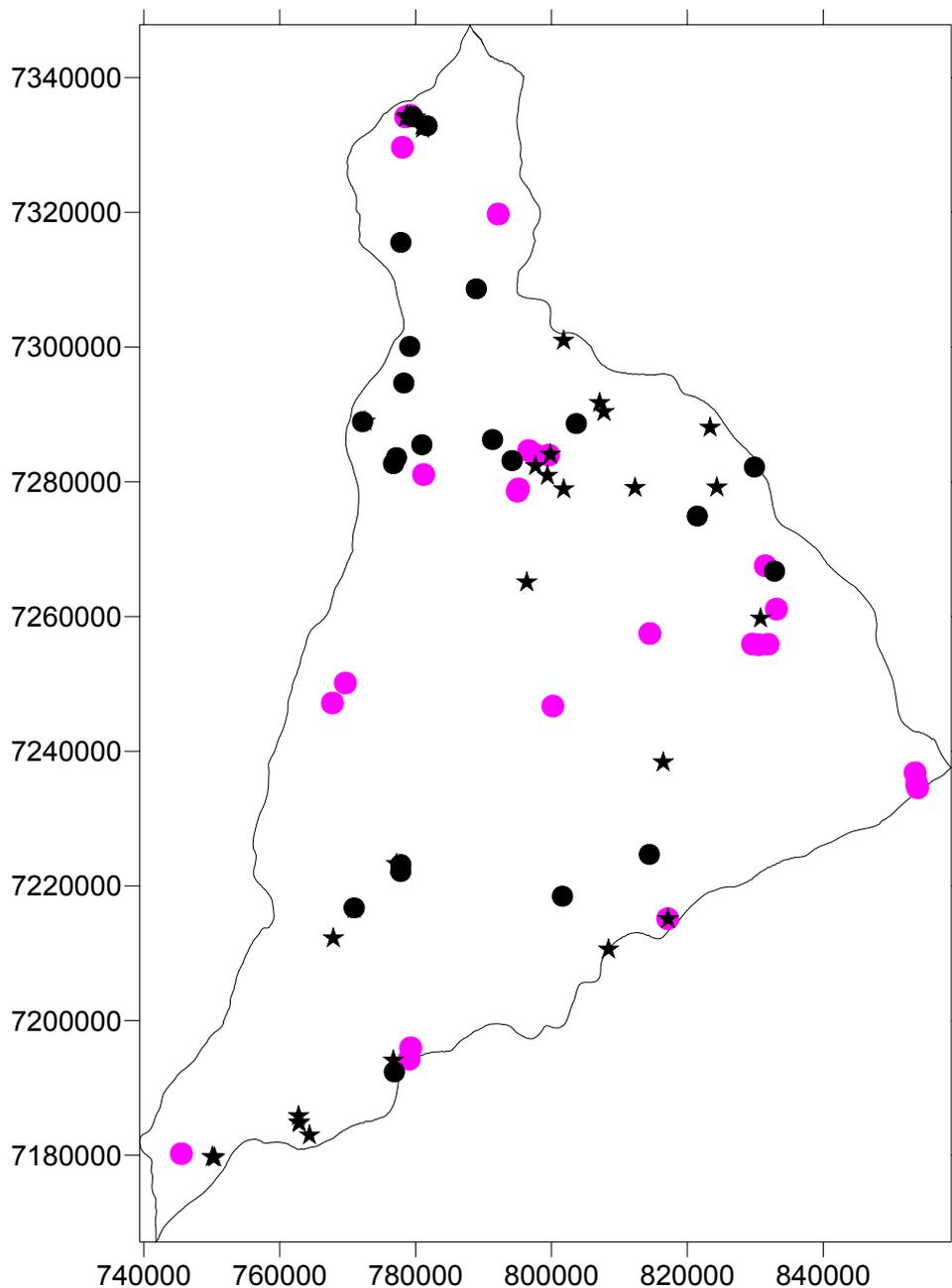
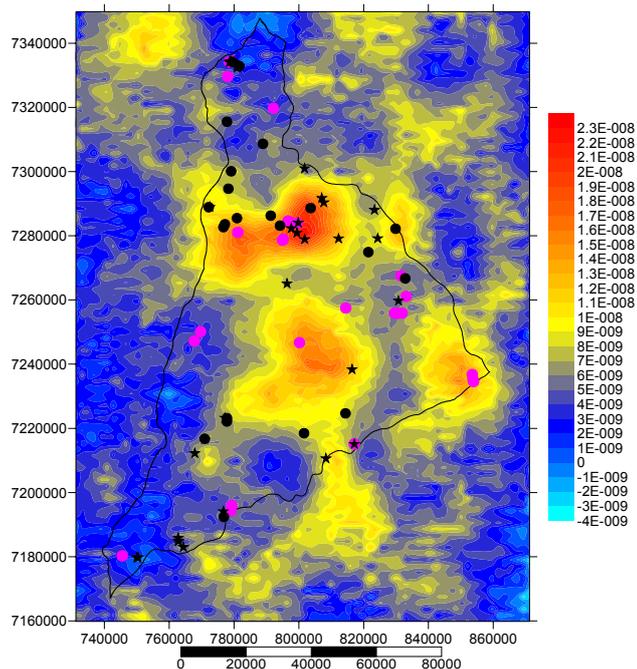


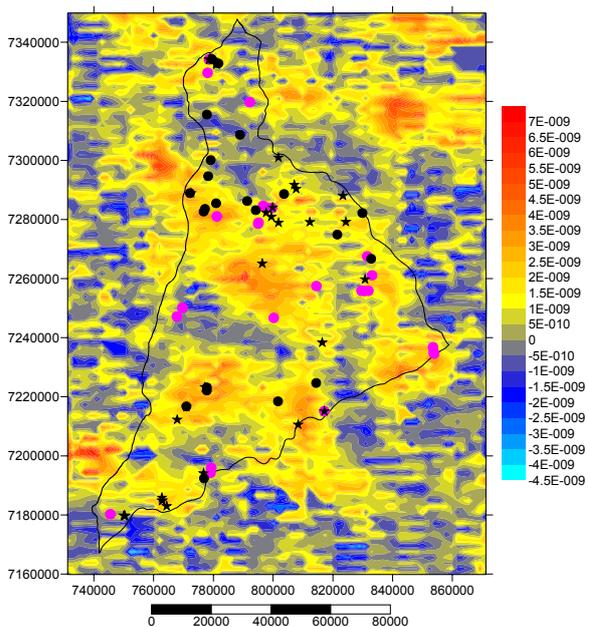
Figura 44 - Localização dos poços utilizados na confecção do mapa de isovazões

A seguir, na Figura 45, Figura 46 e Figura 47, são apresentados os mapas de densidade de lineamentos traçados, sobrepostos ao mapa de vazão. Nestes mapas, na parte superior encontra-se o mapa de densidade total de lineamentos traçados; na parte inferior a esquerda o mapa de densidade de lineamentos da direção azimutal predominante e, na porção inferior direita, observa-se o mapa de densidade da segunda direção azimutal em ocorrência.

Densidade total



N 70° – 60° W



N 40° – 50° E

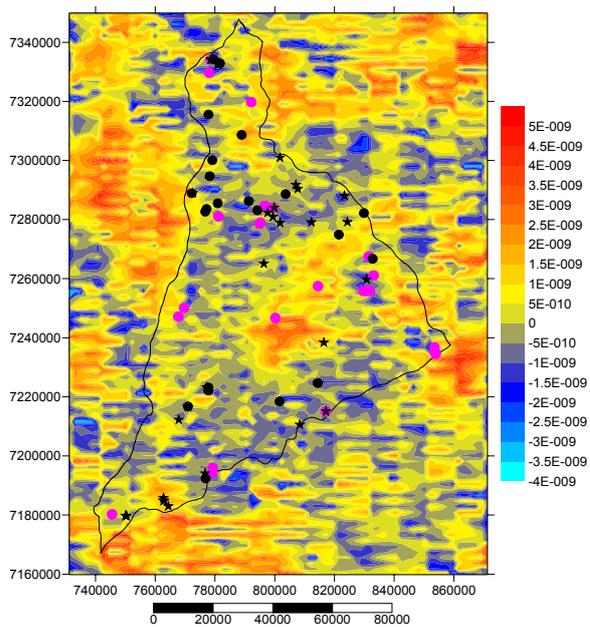
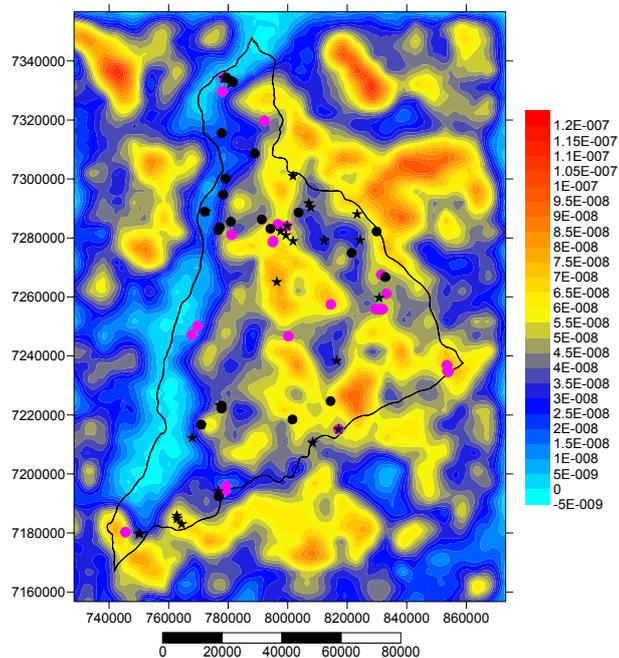
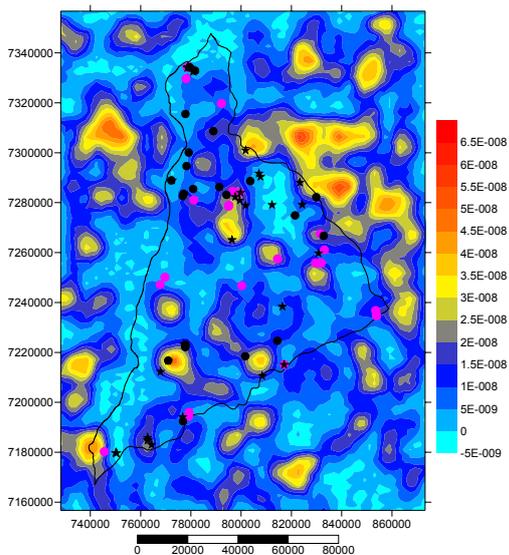


Figura 45 - Traçado 1:600.000

Densidade total



N 70° – 60° W



N 40° – 50° E

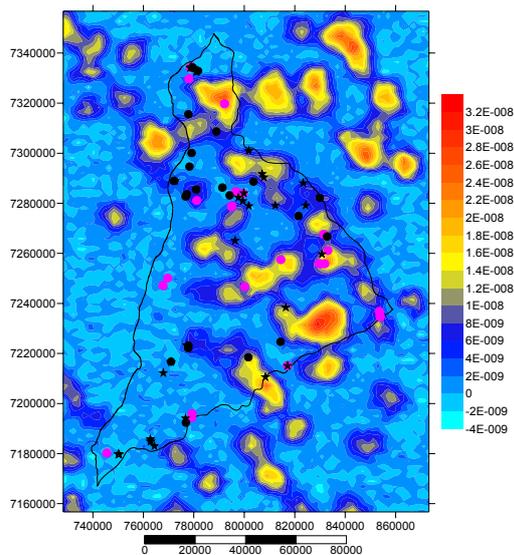
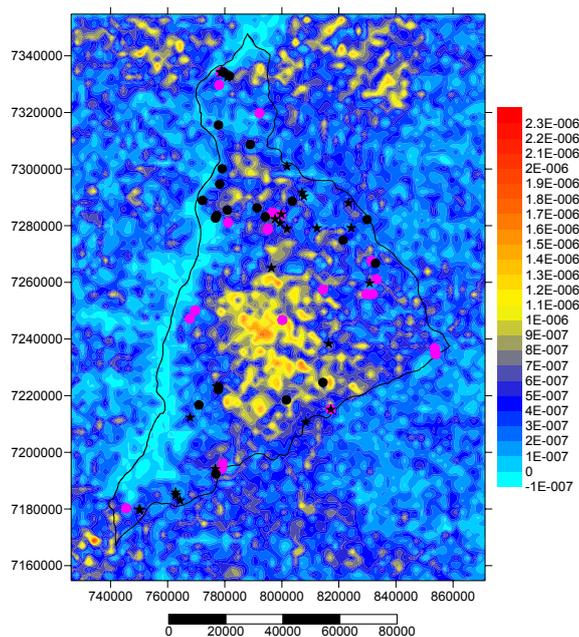
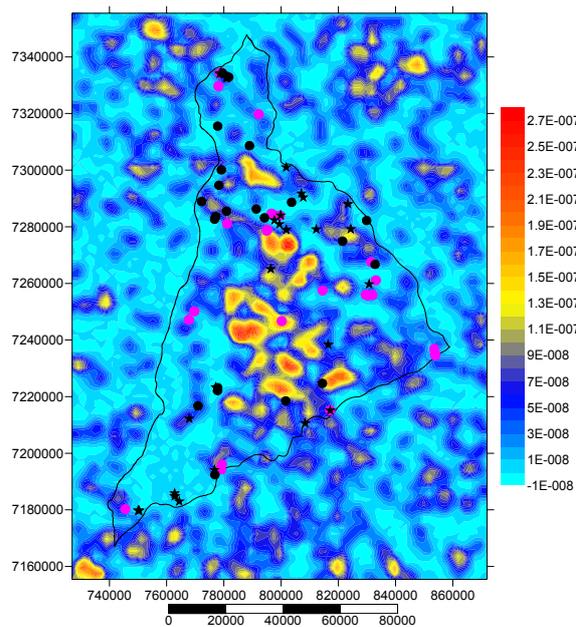


Figura 46 - Traçado 1:300.000

Densidade total



N 70° – 60° W



N 40° – 50° E

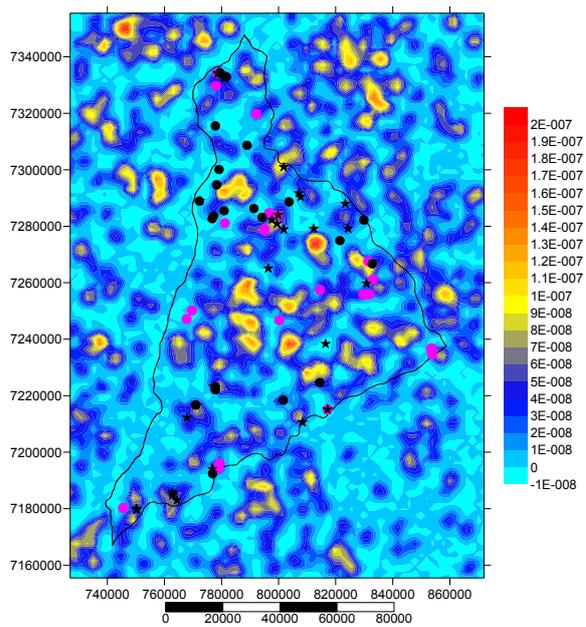


Figura 47 - Traçado 1:100.000

Comparando os mapas de lineamentos e poços tubulares, observa-se que não há uma aparente relação entre densidade de lineamentos e poços com vazões representativas. Ocorrem casos poços com alta vazão em áreas de alta e baixa densidade, assim como com os poços de baixa vazão.

Em algumas áreas, principalmente na região centro norte da bacia, há uma aparente relação inversa entre densidade de lineamentos e a vazão (ou seja, as maiores vazões estão fora das áreas com maior densidade de lineamentos).

Entretanto ressalta-se que existem também poços com alta vazão em áreas de alta densidade de lineamentos (ex: alguns poços na porção central da BPIII).

Na maior parte dos casos, as vazões mais significativas estão nas bordas das áreas de maior densidade.

Desta forma, não se tem uma relação clara, utilizando apenas o parâmetro densidade de lineamentos, para o estabelecimento de regiões potencialmente mais produtoras.

4.3 Hidrogeoquímica da BPIII

Para avaliar a tipologia e a variação do quimismo da água subterrânea do Aquífero Serra Geral na Bacia do Paraná III, foram utilizadas 39 análises físico-químicas de água de poços tubulares profundos (Figura 48).

Na classificação dos tipos de água foram utilizadas todas as amostras coletadas na BPIII, independente de sua localização geográfica. Já na distribuição espacial dos teores, foram utilizadas apenas as análises dos municípios de Marechal Cândido Rondon, Mercedez, Pato Bragado e Entre Rios do Oeste.

O controle de qualidade dos dados analíticos usados baseou-se no cálculo da diferença de balanço iônico (DBI), descartando aqueles que apresentaram $DBI > 10\%$. O valor médio da DBI do conjunto amostral utilizado é igual a 3%.

Dentre os poços estudados, na BPIII, são classificados sete tipos principais de águas: bicarbonatada cálcica (43,6%); bicarbonatada sódica (17,9%); bicarbonatada sódica-cálcica (12,8%); bicarbonatada cálcica-sódica (7,7%); bicarbonatada-carbonatada sódica (7,7%); carbonatada sódica (5,1%); sulfatada-bicarbonatada sódica (5,1%).

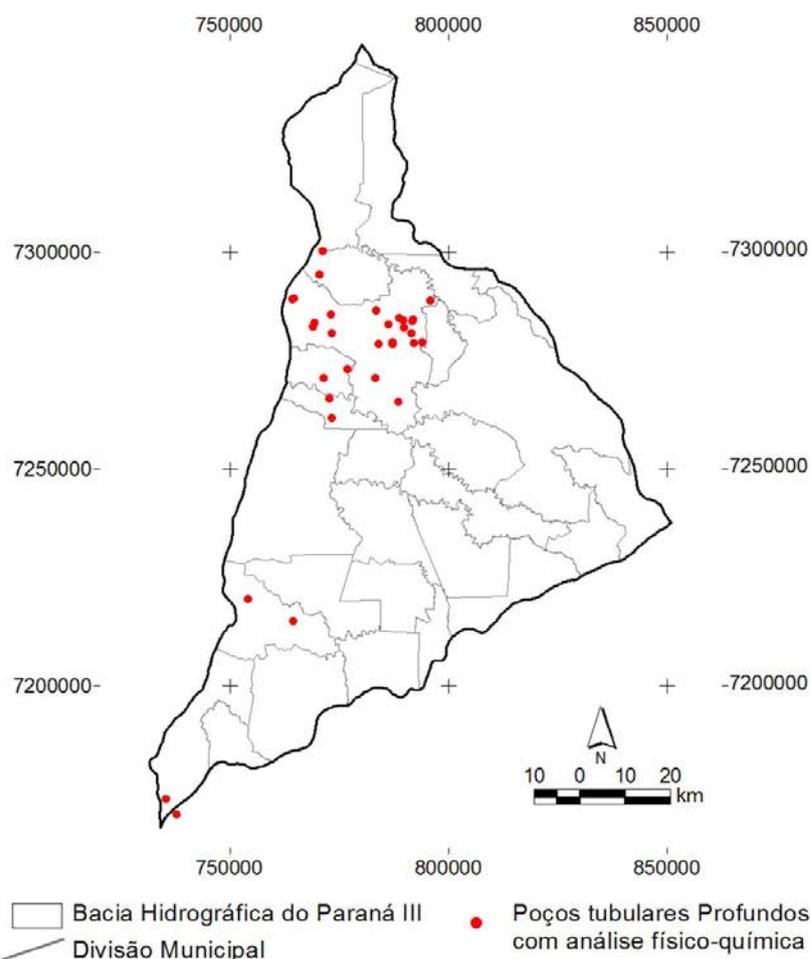


Figura 48 - Localização dos pontos onde foram obtidos os dados para análise hidrogeoquímica

A distribuição percentual dos tipos de água para o conjunto de amostras analisado está apresentado na Figura 49.

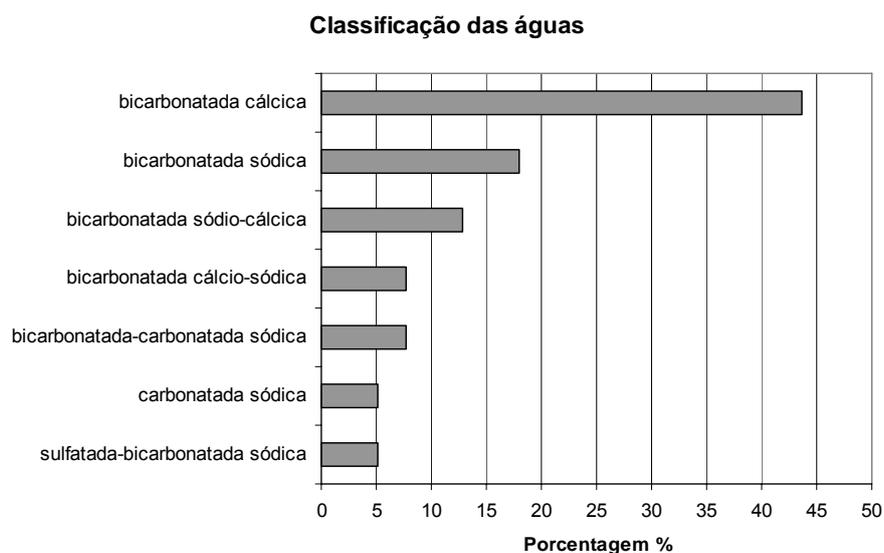


Figura 49 - Distribuição percentual das classes de água com base nas análises físico-químicas das amostras coletadas nos poços tubulares profundos da BP III

A Figura 50 apresenta o diagrama de Piper (1944) para todo o conjunto de amostras. A Figura 51 apresenta a distribuição espacial dos tipos de água dentre as amostras coletadas nos poços tubulares profundos.

No diagrama de Piper observa-se principalmente a tendência das águas bicarbonatadas cálcicas migrarem para o campo correspondente ao tipo de água bicarbonatada sódica. Na Tabela 9 estão os valores médios e medianos dos sete tipos de águas.

O tipo de água denominada de sulfatada bicarbonatada sódica diferencia-se das demais e por isso ficou isolada em relação aos outros tipos estudados. Uma das hipóteses para esta diferença é a contribuição de águas de outros aquíferos no ASG, neste caso em específico, águas do aquífero Guarani (mais ricas em sulfato).

Diagrama de Piper

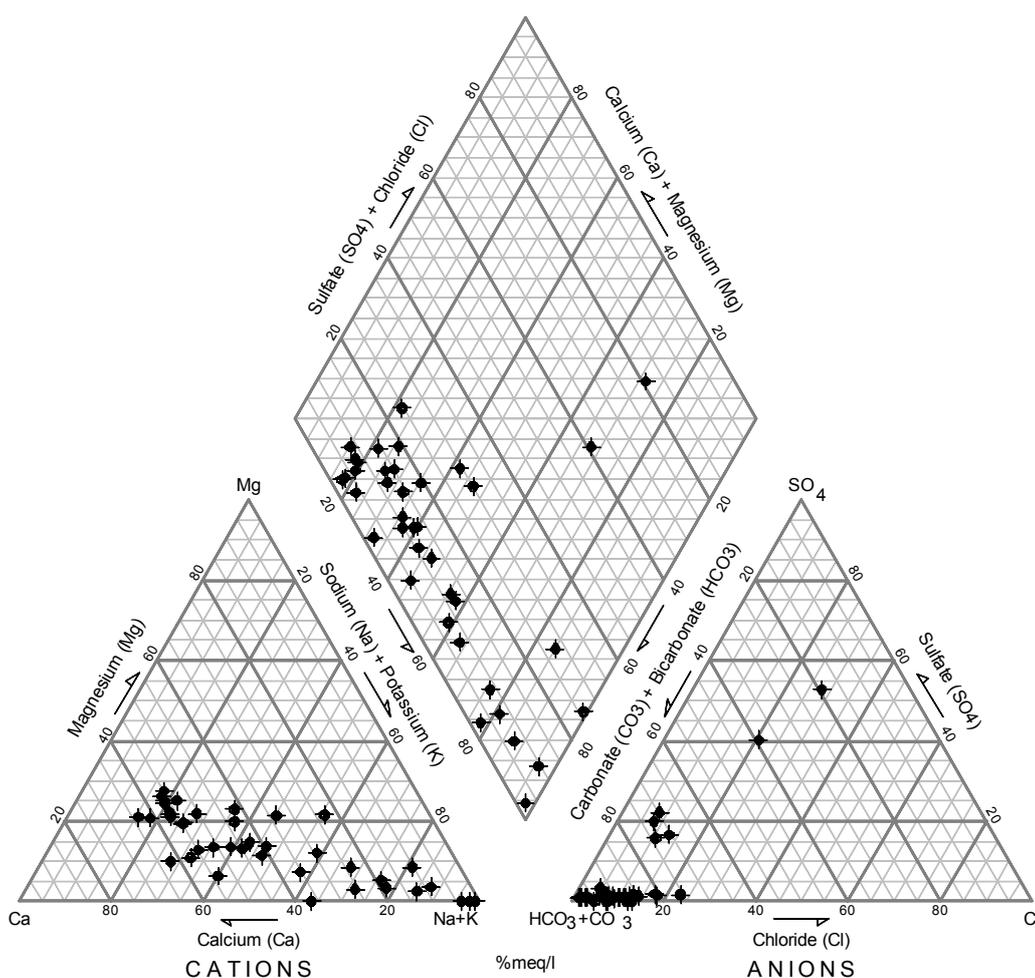


Figura 50 - Diagrama de Piper com 39 amostras de água subterrânea da Bacia do Paraná III

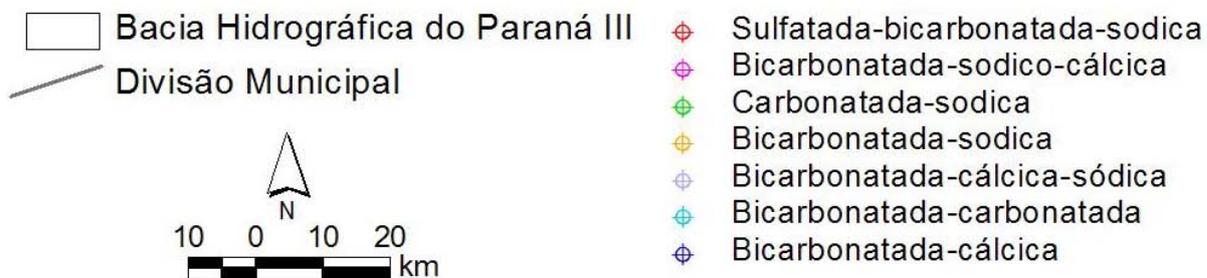
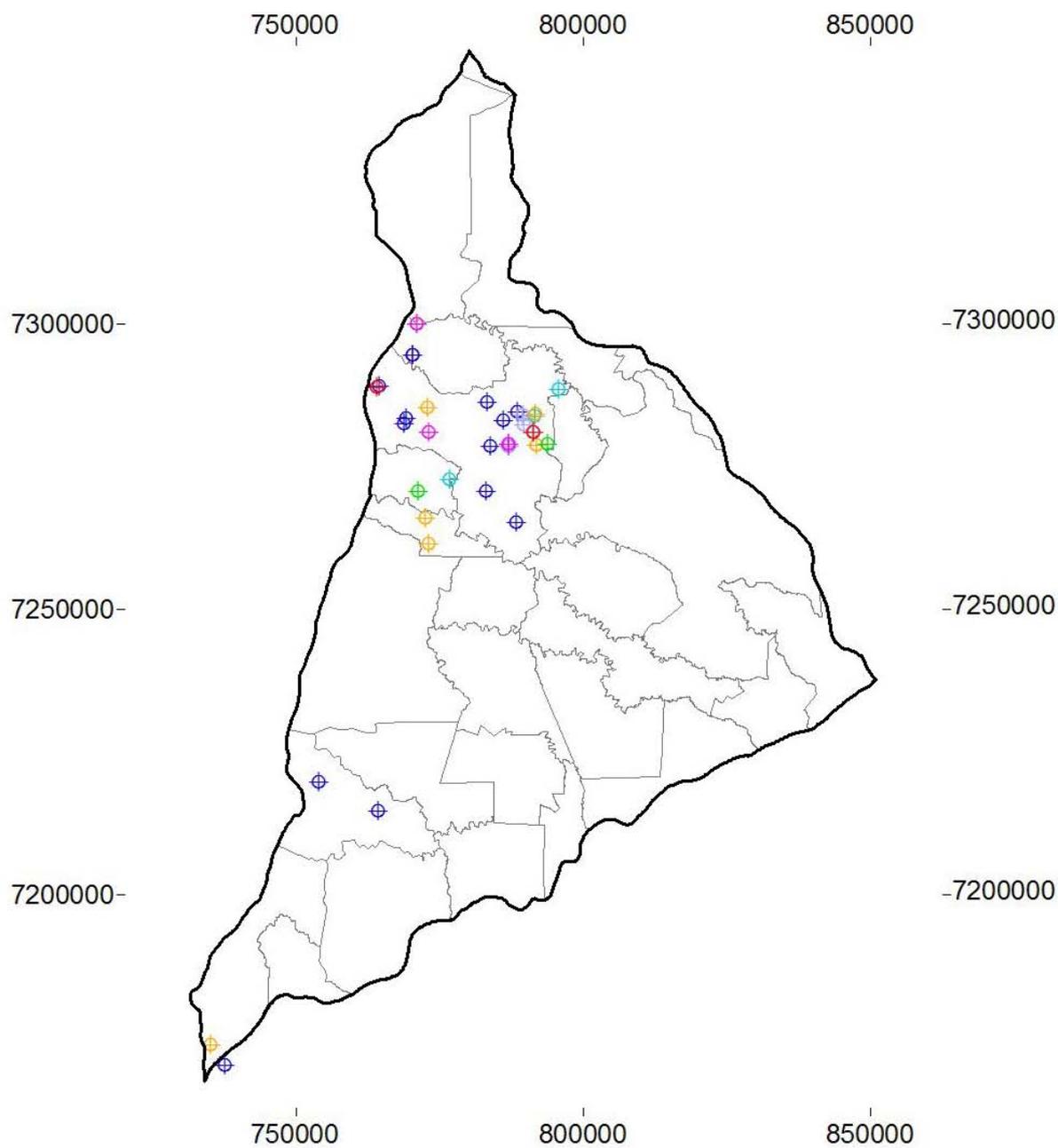


Figura 51 - Distribuição espacial dos tipos de água na BPIII

Tabela 9- Médias das principais concentrações dos parâmetros físico-químicos dos diversos tipos de água subterrânea na BPIII

TIPOS	sulfatada- bicarbonatada sódica	bicarbonatada- carbonatada sódica	carbonatada sódica	bicarbonatada sódica-cálcica	bicarbonatada cálcica-sódica	bicarbonata sódica	bicarbonatada cálcica
Parâmetros	Média	Média	Média	Média	Média	Média	Média
Turbidez (UT)	1,26	0,37	0,39	0,38	0,33	0,44	0,70
Cor (uH)	3,00	0,83	1,25	0,50	0,00	1,07	1,47
Condutividade µS/cm	104,05	165,57	347,45	143,04	114,10	166,54	199,88
pH	8,04	8,71	9,63	7,75	7,32	8,73	7,45
Dureza (mg/L)	78,00	24,56	4,27	63,72	65,67	26,58	68,24
STD (mg/L)	123,00	99,33	205,00	76,20	53,67	103,57	79,53
SiO ₂ ⁻ (mg/L)	32,65	34,91	31,25	33,37	34,86	34,48	37,53
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	73,49	54,01	55,13	99,71	85,63	93,29	86,00
CO ₃ ²⁻ (mg/L)	4,08	17,11	62,12	0,00	0,00	13,01	0,37
Cl ⁻ (mg/L)	40,50	5,78	13,04	6,63	7,00	4,39	4,67
F ⁻ (mg/L)	0,26	0,15	0,35	0,33	0,08	0,39	0,11
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	105,00	8,93	19,05	7,54	1,00	0,64	0,76
NO ₃ ⁻ (mg/L)	1,33	3,75	2,04	5,22	7,23	2,93	6,84
Ca ²⁺ (mg/L)	25,65	8,69	1,41	19,31	18,53	7,49	20,41
Mg ²⁺ (mg/L)	3,40	0,70	0,18	4,16	4,70	2,27	4,27
Na ⁺ (mg/L)	82,50	32,70	90,00	24,26	17,60	41,17	9,93
K ⁺ (mg/L)	0,42	0,43	0,38	0,52	0,47	0,51	0,56
Ferro total (mg/L)	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,06	0,07
Número de amostras (N)	2	3	2	5	3	7	17

4.3.1 Classificação das águas subterrâneas

4.3.1.1 Águas do tipo sulfatada-bicarbonatada sódica

As águas classificadas como sulfatada-bicarbonatada sódica têm as concentrações mais elevadas do ânion cloreto e o segundo maior valor médio de sódio.

As análises deste grupo localizam-se no município de Marechal Cândido Rondon a uma distância aproximada de 28 km entre si. Um poço situa-se na margem do Reservatório de ITAIPU BINACIONAL (Figura 52 em vermelho), com 85 mg/L de sulfato e 75 mg/L de sódio (composição mista); o outro, localizado próximo à área urbana do município e possui 125 mg/L de sulfato e 90 mg/L de sódio, podendo ser classificado como água sulfatada (Figura 52 em preto).

O gráfico da Figura 53 apresenta os valores médios das águas sulfatadas-bicarbonatadas sódicas.

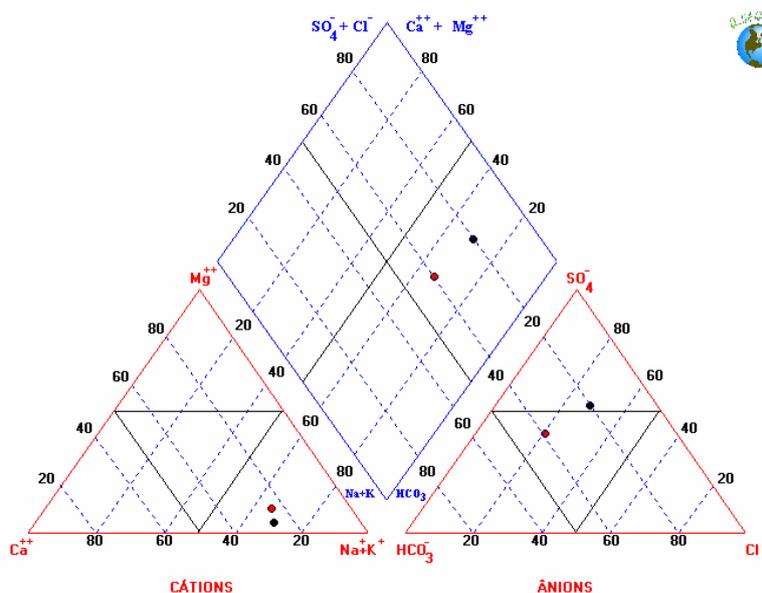


Figura 52 - Diagrama de Piper para as águas sulfatadas-bicarbonatadas sódicas

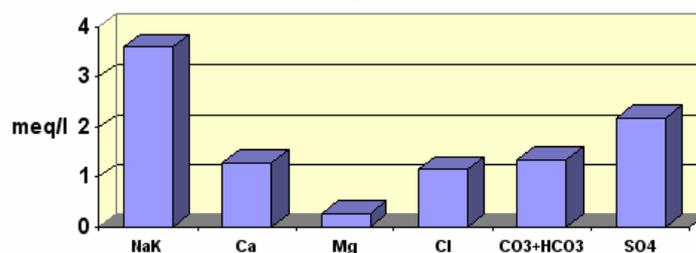


Figura 53 - Gráfico com a média dos valores da água sulfatada-bicarbonatada sódica

4.3.1.2 Águas do tipo bicarbonatada-carbonatada sódica

Os três poços que caracterizam este tipo de água situam-se a uma distância mínima de 6 km e máxima de 24 km entre si, sendo que os dois mais próximos estão localizados em MCR e o outro no município de Pato Bragado. Estes poços apresentam pH entre 8,33 e 9,29; valores de carbonato entre 14,56 mg/L e 20,12 mg/L e sódio entre 27,9 mg/L e 46,30 mg/L (Figura 54).

O gráfico da Figura 55 apresenta os valores médios da água bicarbonatada-carbonatada sódica.

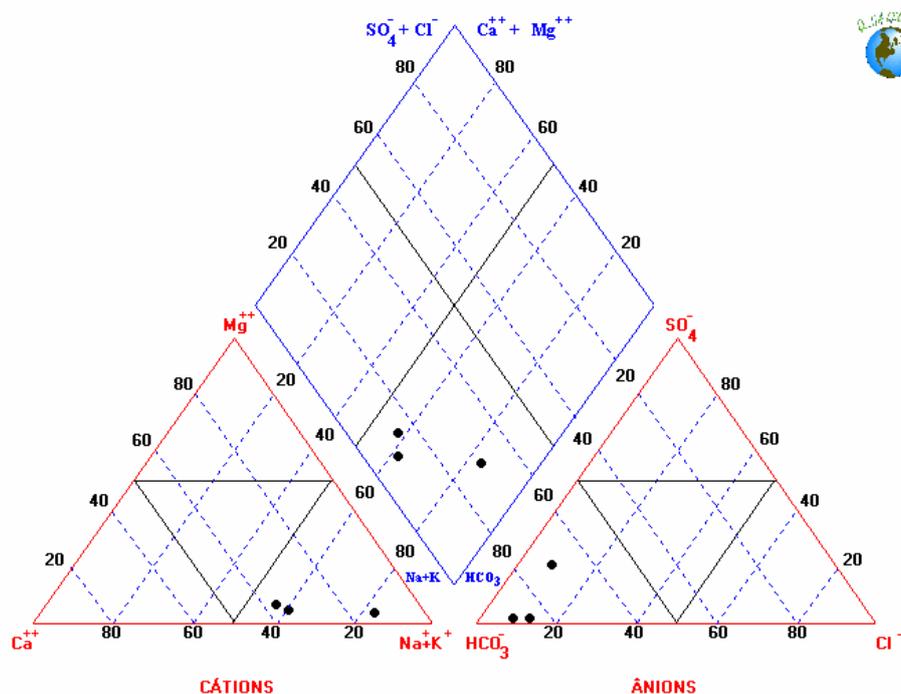


Figura 54 - Diagrama de Piper para as águas bicarbonatadas-carbonatadas sódicas

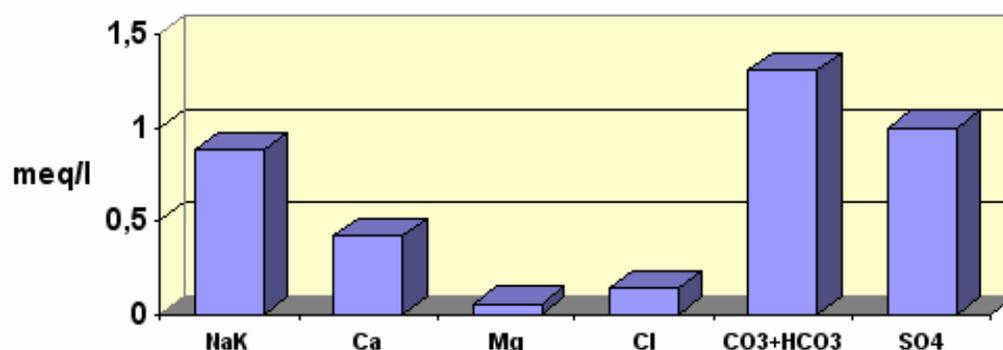


Figura 55 - Estatística com a média dos valores água bicarbonatada-carbonatada sódica

4.3.1.3 Águas do tipo carbonatada sódica

As águas carbonatadas sódicas têm os valores mais elevados de condutividade, pH, sólidos totais dissolvidos, carbonato, sódio e concentrações elevadas de sulfato.

Estes dois poços distam-se 24 km um do outro, sendo que um deles localiza-se no Município de Pato Bragado com pH de 10,05; cloreto de 18,08 mg/L e sódio de 37,10 mg/L. O outro situado em MCR apresentou pH de 9,21, cloreto de 8,0 mg/L e sódio de 25,40 mg/L.

O diagrama de Piper elaborado com as concentrações químicas dos cátions e ânions das amostras de água está na Figura 56, sendo que o poço situado em MCR é plotado em vermelho e o poço de Pato Bragado em preto.

O gráfico da Figura 57 apresenta os valores médios das águas bicarbonatada-carbonatada sódica e carbonatada sódica.

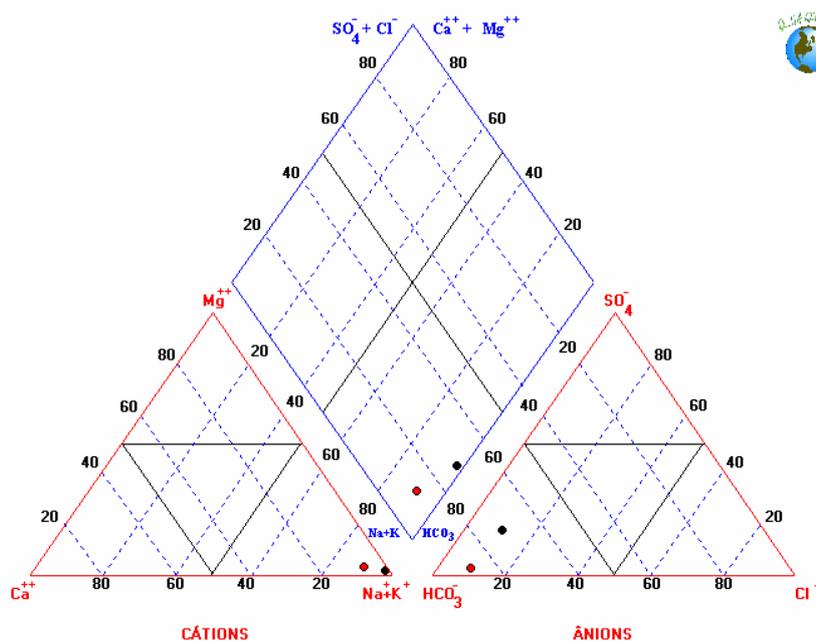


Figura 56 - Diagrama de Piper para as águas carbonatadas sódicas

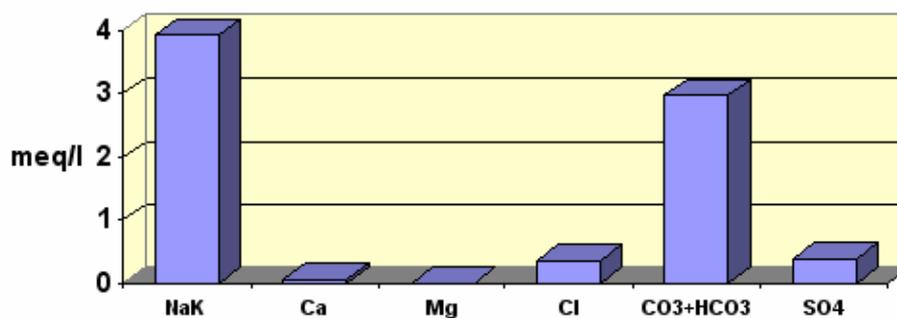


Figura 57 - Gráfico com a média dos valores das águas carbonatadas sódicas

4.3.1.4 Águas do tipo bicarbonatada sódica-cálcica

Todos os cinco poços localizam-se em MCR e possuem águas classificadas em bicarbonatadas sódico-cálcicas têm valores de pH entre 6,86 e 8,02.

O diagrama de Piper elaborado com este tipo de água pode ser observado na Figura 58. O gráfico dos principais cátions e ânions das águas bicarbonatadas sódico-cálcicas encontra-se na Figura 59.

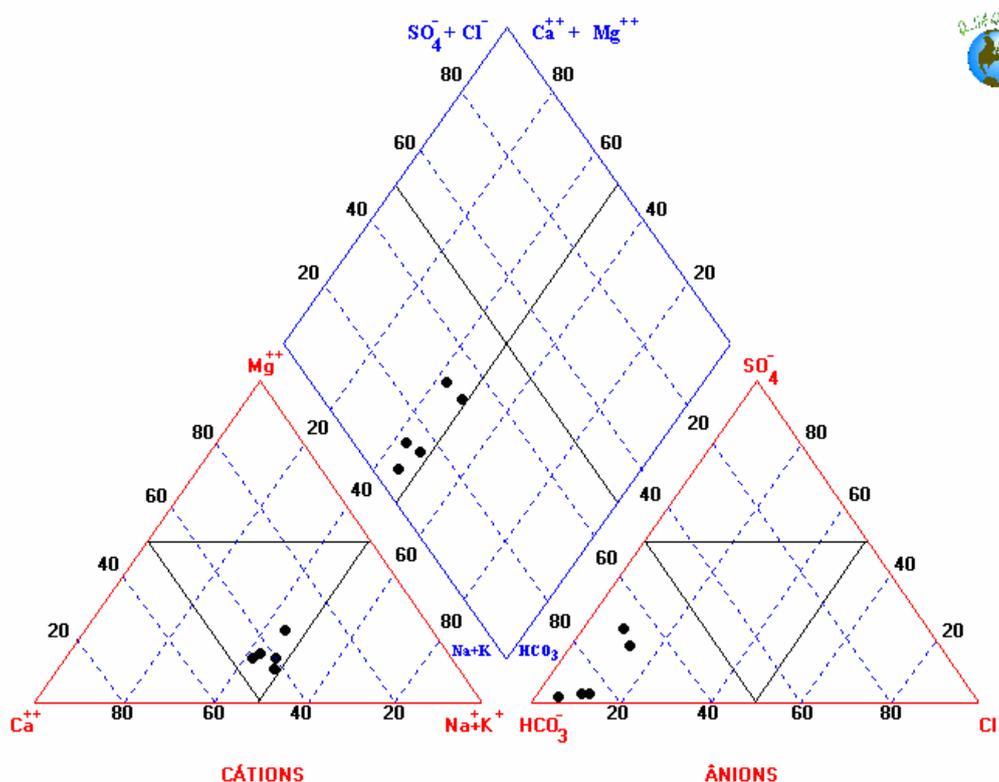


Figura 58 - Diagrama de Piper para as águas bicarbonatadas sódico-cálcicas

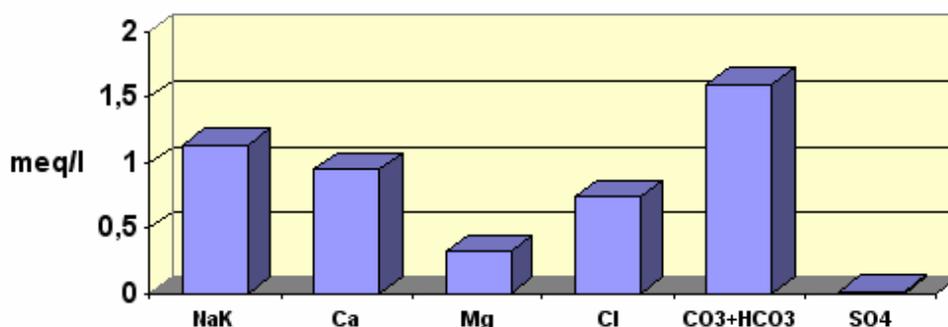


Figura 59 - Gráfico com a média dos valores das águas bicarbonatadas sódico-cálcicas

4.3.1.5 Águas do tipo bicarbonatada cálcica-sódica

Todos os três poços localizam-se em Marechal Cândido Rondon e têm valores de pH entre 6,93 e 7,62. Na Figura 60 observa-se o diagrama de Piper para esta classificação.

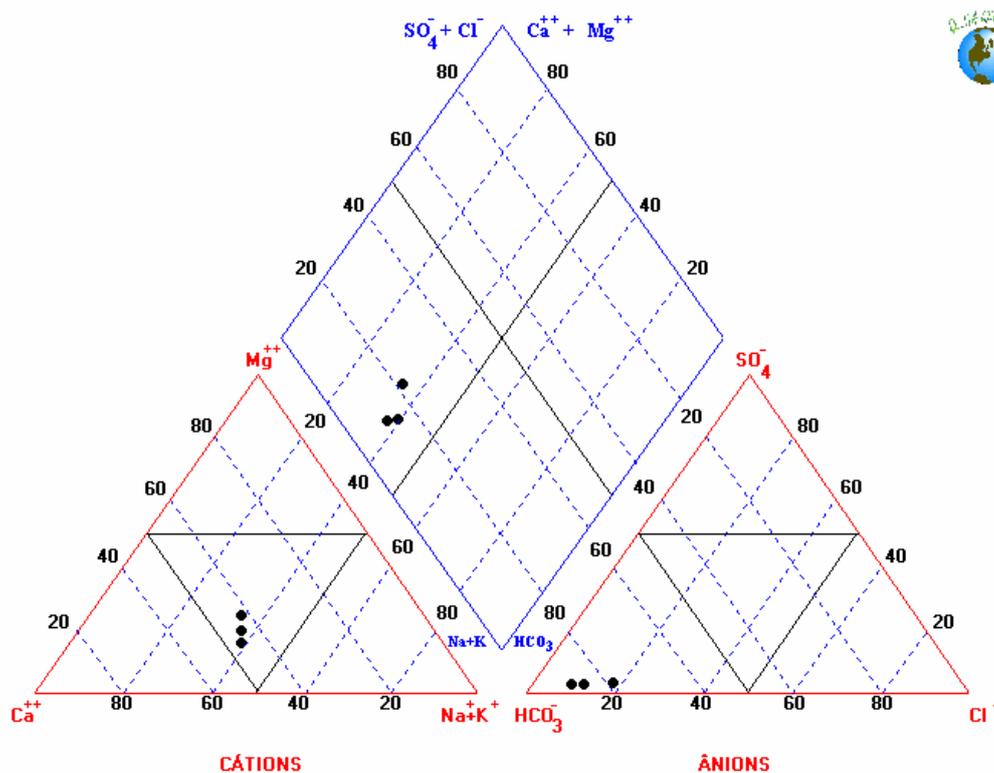


Figura 60 - Diagrama de Piper para as águas bicarbonatadas cálcicas-sódicas

O gráfico com os principais cátions e ânions das águas bicarbonatadas cálcicas-sódicas é apresentado na Figura 61

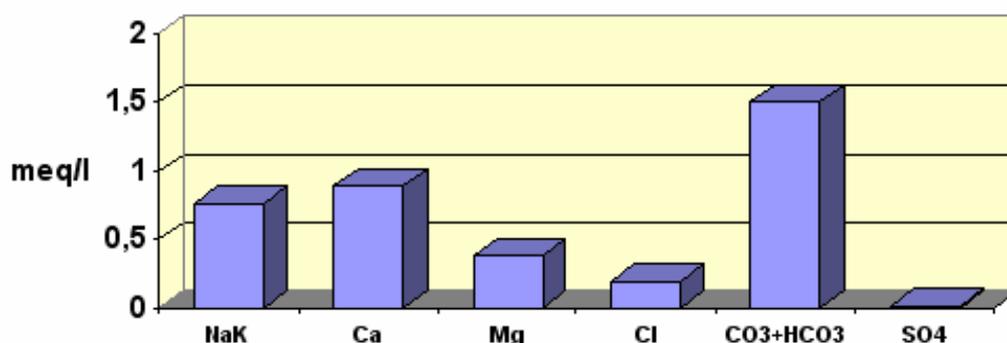


Figura 61 - Estatística com os valores médios da água bicarbonatada cálcica-sódica

4.3.1.6 Águas do tipo bicarbonatada sódica

Dos sete poços com este tipo químico de água, três localizam-se em Marechal Cândido Rondon, dois situam-se no município de Entre Rios do Oeste, um Mercedes e um em Foz do Iguaçu. O pH desta águas varia de 7,90 (poço de Mercedes) a 9,62 no poço de Entre Rios do Oeste.

Na Figura 62 observa-se o diagrama de Piper com as análises físico-químicas dos poços com esta classificação.

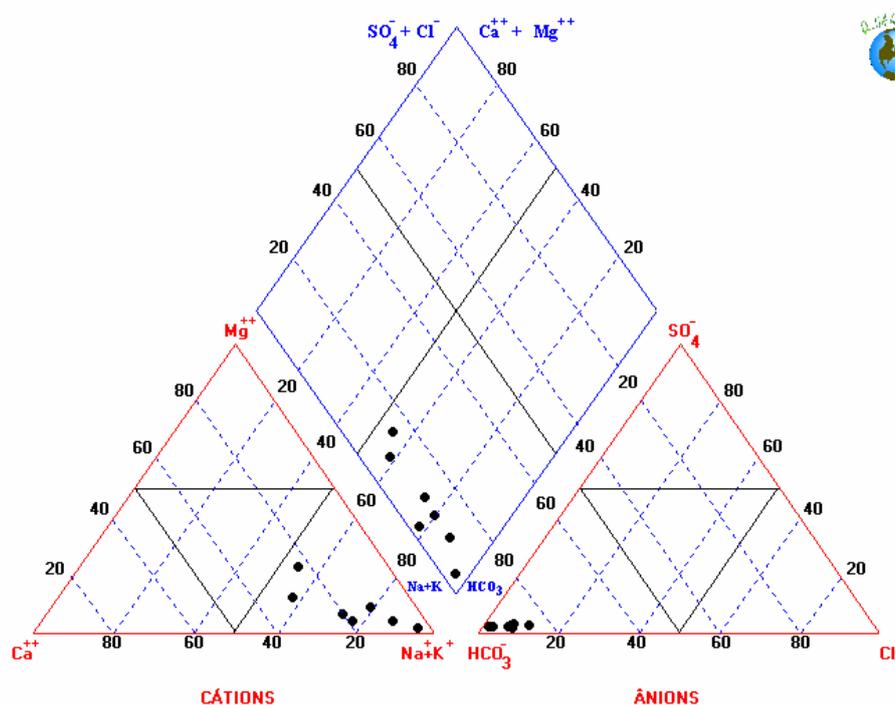


Figura 62 - Diagrama de Piper para as águas bicarbonatadas sódicas

O gráfico contendo os teores dos principais cátions e ânions das águas bicarbonatadas sódicas é apresentado na Figura 63.

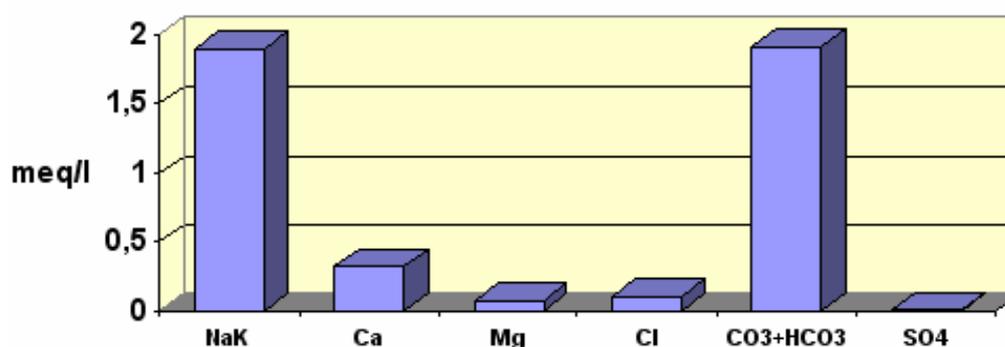


Figura 63 - Gráfico com a média dos valores das águas bicarbonatadas sódicas

4.3.1.7 Águas do tipo bicarbonatada cálcica

As águas do tipo bicarbonatada cálcica caracterizam-se como predominantes no Aquífero Serra Geral e, neste trabalho em específico, correspondem a 43,6% das amostras coletadas.

Dentre os 17 poços classificados com este tipo de água, 12 estão situados em MCR, dois em Mercedes, dois em Itaipulândia e um situado em Foz do Iguaçu.

O pH destas águas varia de 6,45 a 8,37, as concentrações de cálcio estão entre 6,52 mg/L (poço em Itaipulândia) a 33,72 mg/L no poço da Bacia do Rio Ajuricaba em MCR.

Na Figura 64 observa-se o diagrama de Piper com as águas deste tipo de água. O gráfico apresentado na Figura 65 apresenta os principais cátions e ânions das águas bicarbonatadas cálcicas.

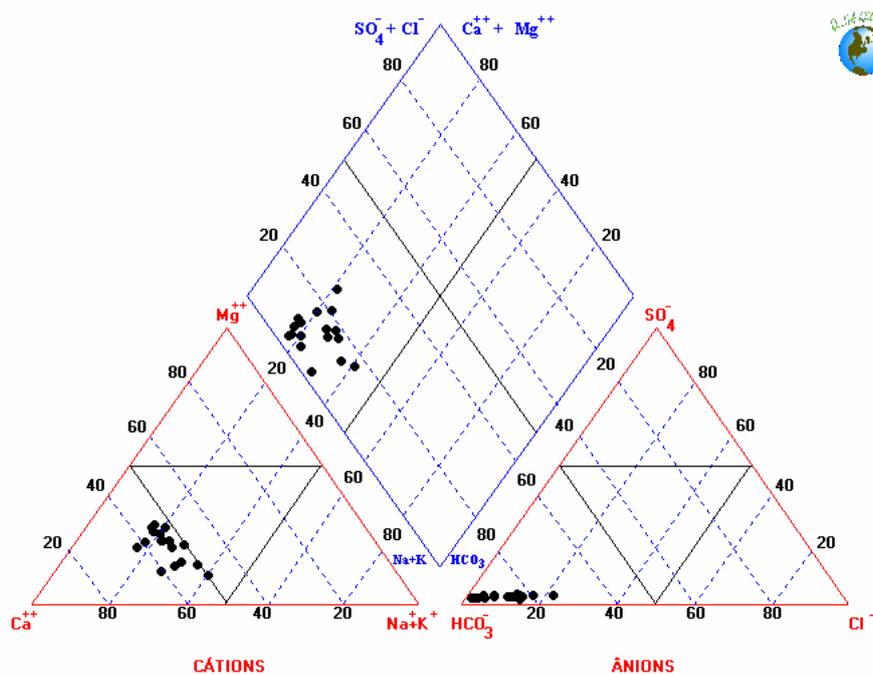


Figura 64 - Diagrama de Piper para as águas bicarbonatadas cálcicas

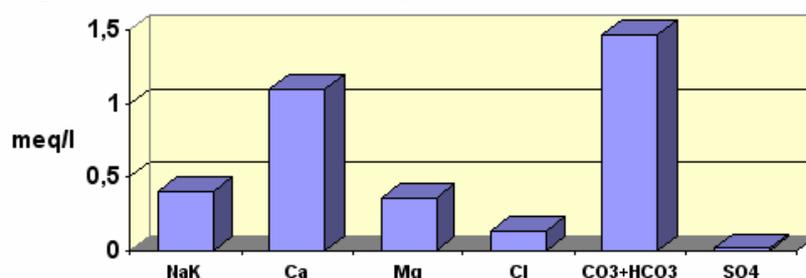


Figura 65 - Gráfico com a média dos valores das águas bicarbonatadas cálcicas

4.3.2 Qualidade das águas para Irrigação

O diagrama da Figura 66 mostra a qualidade da água para irrigação utilizando as amostras de água subterrânea coletadas nos poços da BP III. Das 39 amostras nota-se que:

- 15 poços têm risco nulo (C0-S1) com valores de condutividade abaixo de 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Devido a escala do gráfico estas amostras não estão representadas.
- 18 poços têm riscos de sódio baixo e risco de salinidade baixo (C1-S1).
- Seis poços possuem valores de sódio ou salinidade que indicam restrições. Estes poços estão distribuídos da seguinte maneira:
- Um poço, localizado no município de Pato Bragado tem risco de médio sódio e baixo risco de salinidade (C1-S2).
- Um poço em Entre Rios do Oeste tem risco de sódio médio e risco de salinidade médio (C2-S2).
- Dois poços têm risco de salinidade médio (C2-S1). Um localizado em MCR, na bacia do rio Ajuricaba e outro em Pato Bragado.
- Um poço em Foz do Iguaçu com condutividade igual a 1479 $\mu\text{S}/\text{cm}$ tem risco de salinidade alto (C3-S1).
- Um poço em Pato Bragado com 123 mg/L de sódio, tem risco de sódio muito forte e médio risco de salinidade (C2-S4). Neste caso o valor de Razão de Adsorção de sódio é 33,8. Uma vez que o limite de representação gráfica é 30, esta amostra não é representada no gráfico.

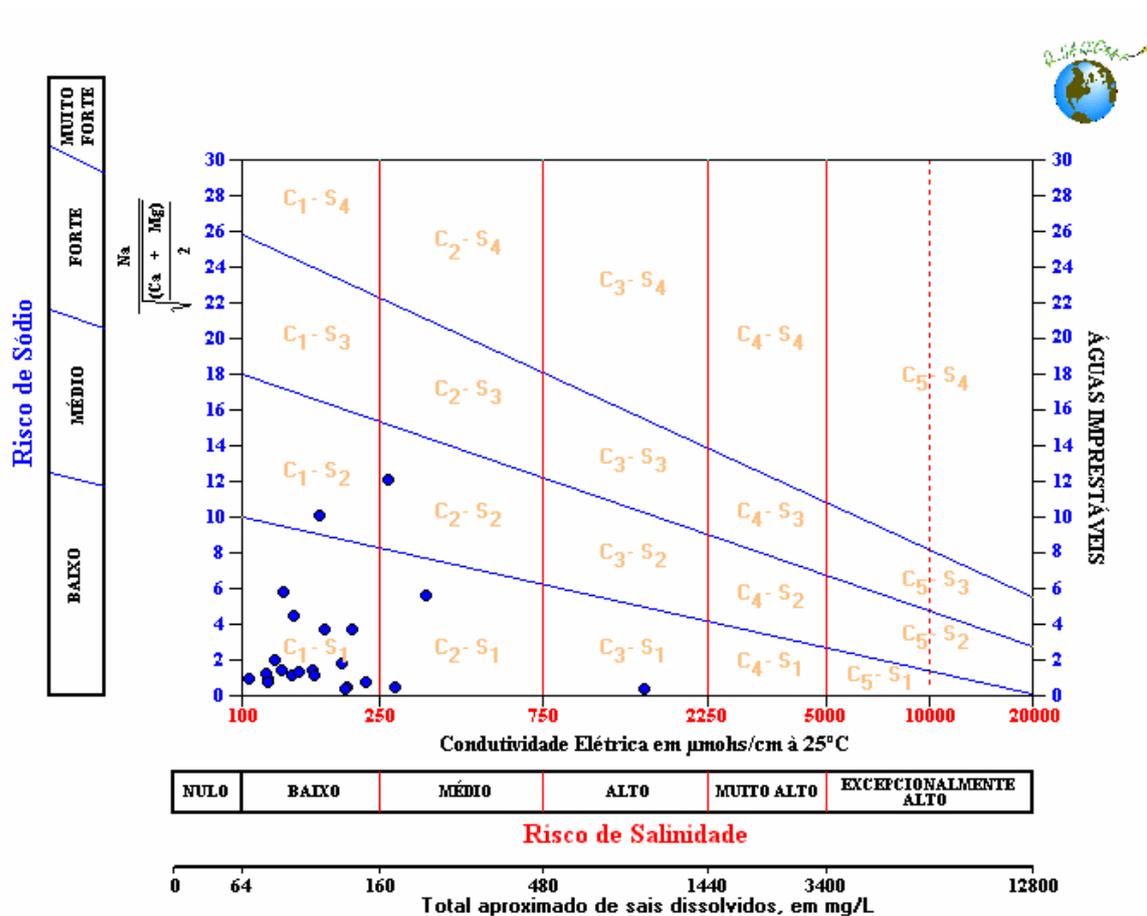


Figura 66 - Diagrama de classificação de água para irrigação, com amostras de águas subterrâneas da Bacia do Paraná III.

De uma forma em geral as águas do ASG aqui estudadas podem ser aplicadas na irrigação.

Entretanto, uma vez que ocorrem variações entre os poços na concentração dos parâmetros, no caso o sódio e condutividade (com magnitude para restringir sua utilização na irrigação), devem ser realizadas análises físico-químicas locais visando à correta aplicação das águas.

4.3.3 Análise numérica e distribuição espacial dos dados

Na análise espacial dos cátions e ânions, foram utilizadas 34 análises de poços tubulares coletadas em MCR, Mercedes, Entre Rios do Oeste e Pato Bragado. As análises de água dos poços localizados em Itaipulândia e Foz do Iguaçu foram desconsideradas, na distribuição espacial dos teores, em virtude da falta de informações (poços tubulares) de qualidade, em outros municípios.

O mapa da Figura 67 apresenta, com hachuras em cor, os municípios da BP III onde foi realizada a análise espacial da distribuição dos teores nas águas subterrâneas.

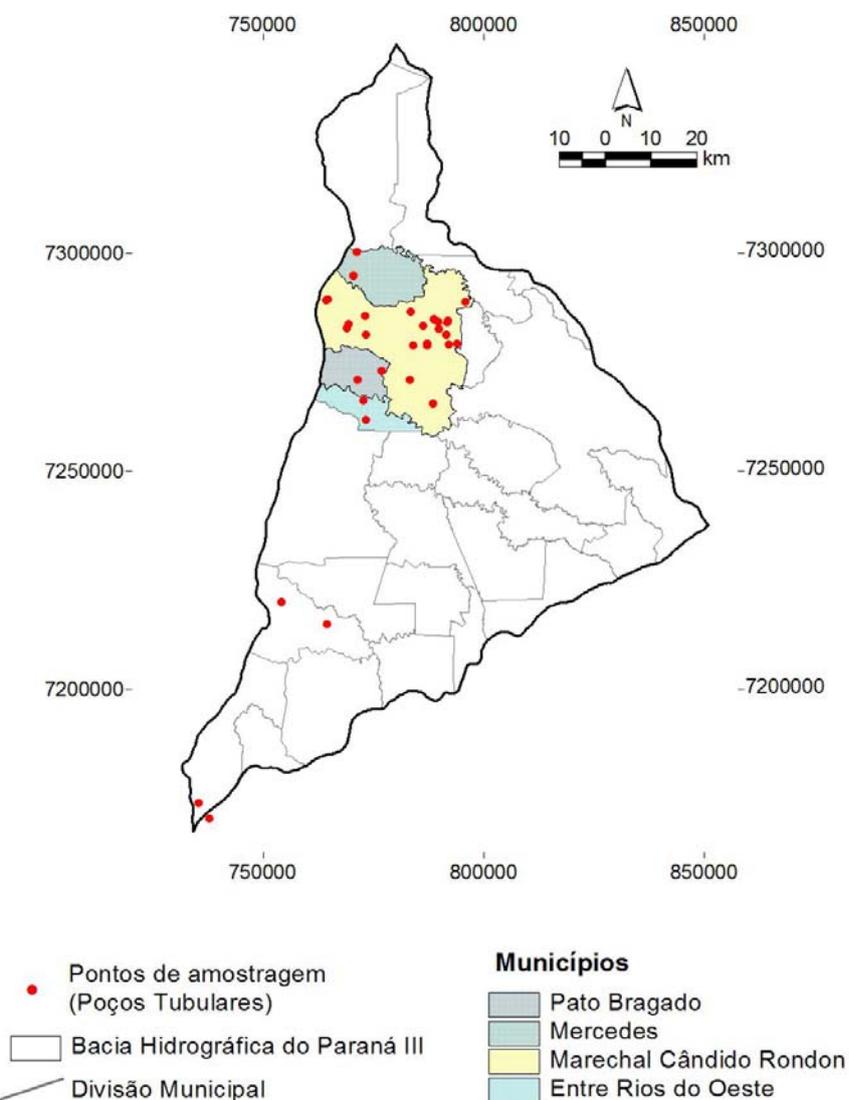
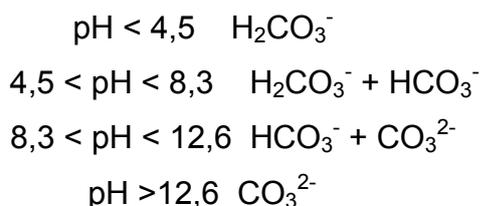


Figura 67 - Municípios da BP III onde foi estudada a distribuição dos elementos químicos na água subterrânea

A seguir, apresenta-se a descrição estatística dos parâmetros analisados e sua distribuição espacial. Ressalta-se que os poços também estão separados segundo os teores dos elementos nas análises, utilizando os dados estatísticos referentes ao primeiro, segundo e terceiro quartis.

4.3.3.1 Bicarbonato

O dióxido de carbono dissolvido naturalmente na água aparece nas análises químicas, principalmente, na forma dos íons CO_3^{2-} e HCO_3^- . A ocorrência de H_2CO_3^* (ácido carbônico), HCO_3^- (bicarbonato) e CO_3^{2-} (carbonato) está relacionada ao pH da seguinte maneira (Custodio e Llamas, 1983a; Freeze, Cherry, 1979; Fetter, 1994):



A estatística univariada do HCO_3^- é apresentada na Figura 68 e sua distribuição espacial é apresentada na Figura 69.

Dados estatísticos do bicarbonato (mg/L)	
Número de dados	34
Valor Mínimo	32,2
Valor Máximo	133,1
Média	84,4
Mediana	88,7
Moda	57,2

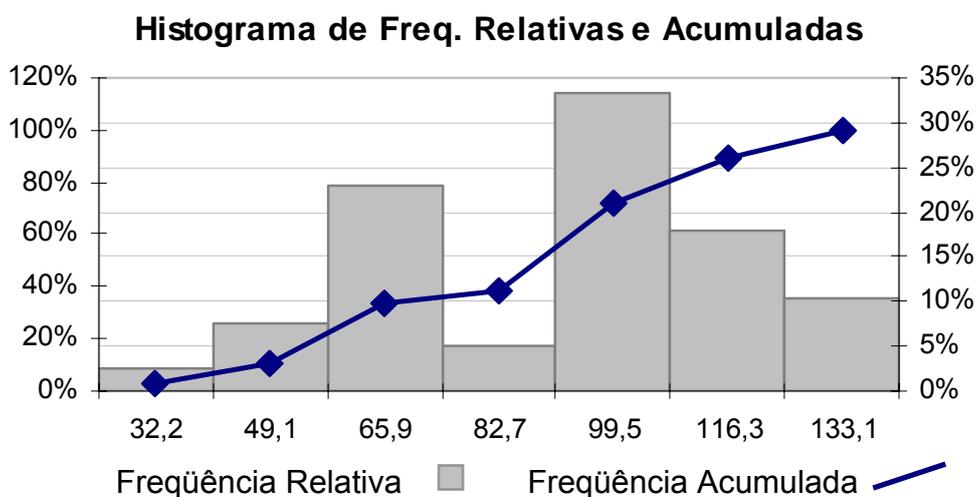


Figura 68 - Estatística univariada do ânion HCO_3^-

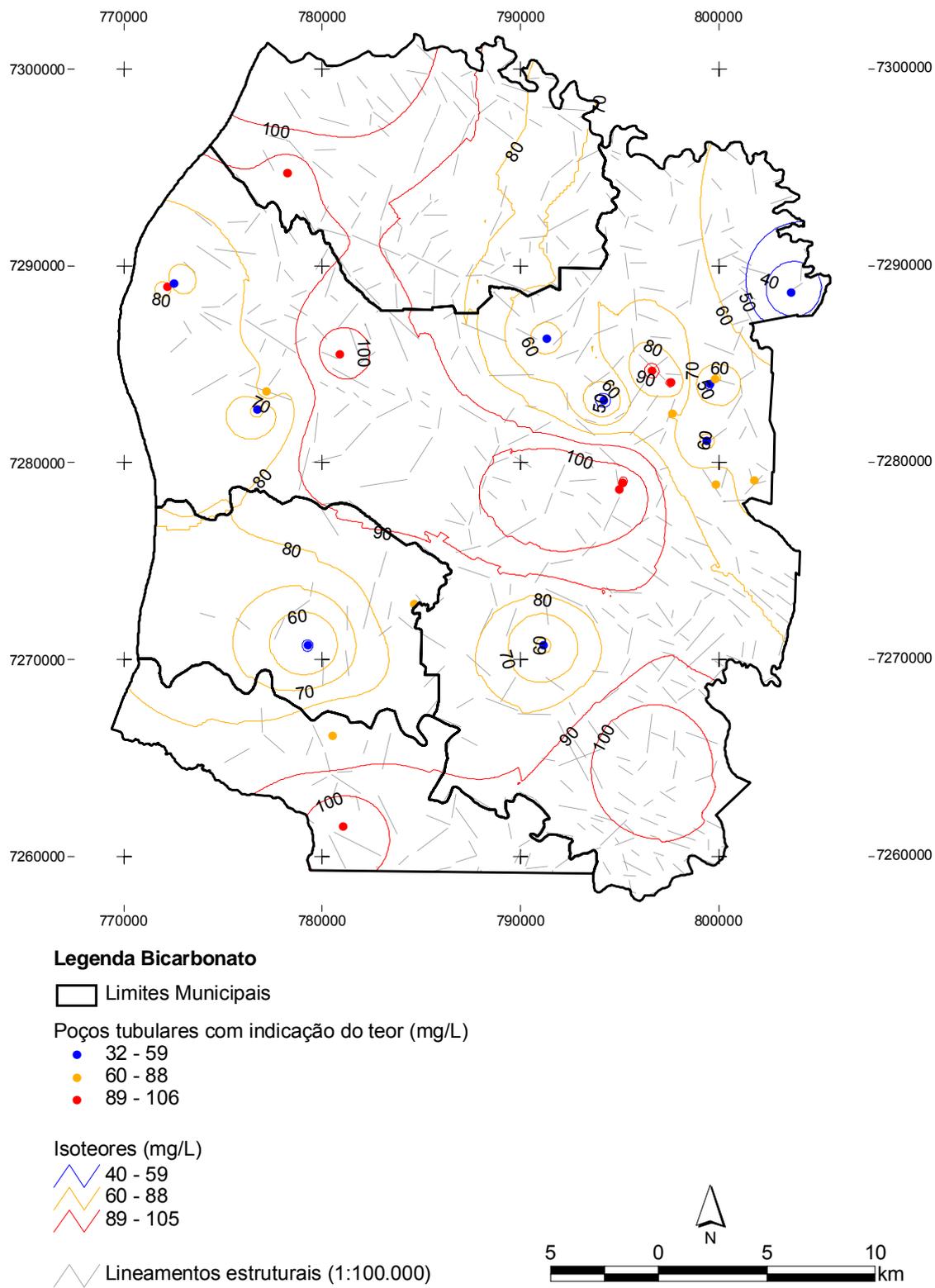


Figura 69 - Mapa com a distribuição espacial dos isotopes de HCO_3^-

4.3.3.2 Carbonato

Como já descrito nos íons bicarbonato, o CO_3^{2-} também depende do pH. A existência de carbonato nas águas só ocorre quando os valores de pH superam 8,3.

A estatística do univariada do carbonato é apresentada Figura 70. A distribuição espacial do ânion carbonato é apresentada na Figura 71.

Dados estatísticos do carbonato (mg/L)	
Número de dados	34
Valor Mínimo	0,0
Valor Máximo	83,8
Média	7,2
Mediana	0,0
Moda	0,0

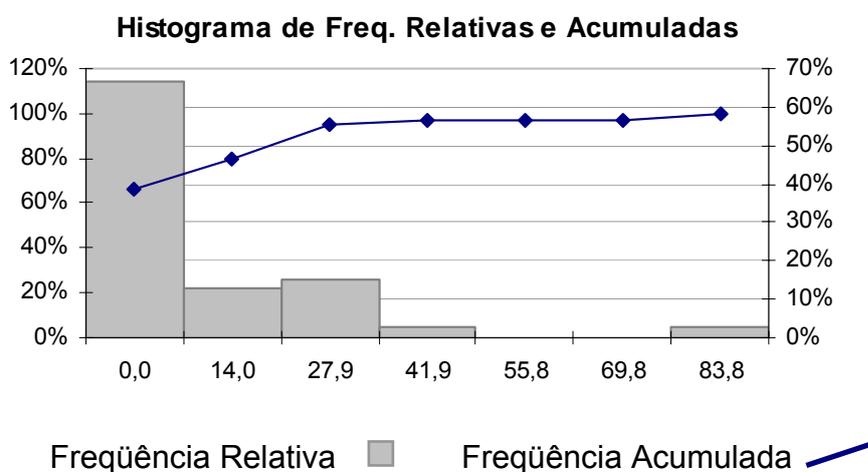


Figura 70 - Estatística univariada do íon CO_3^{2-}

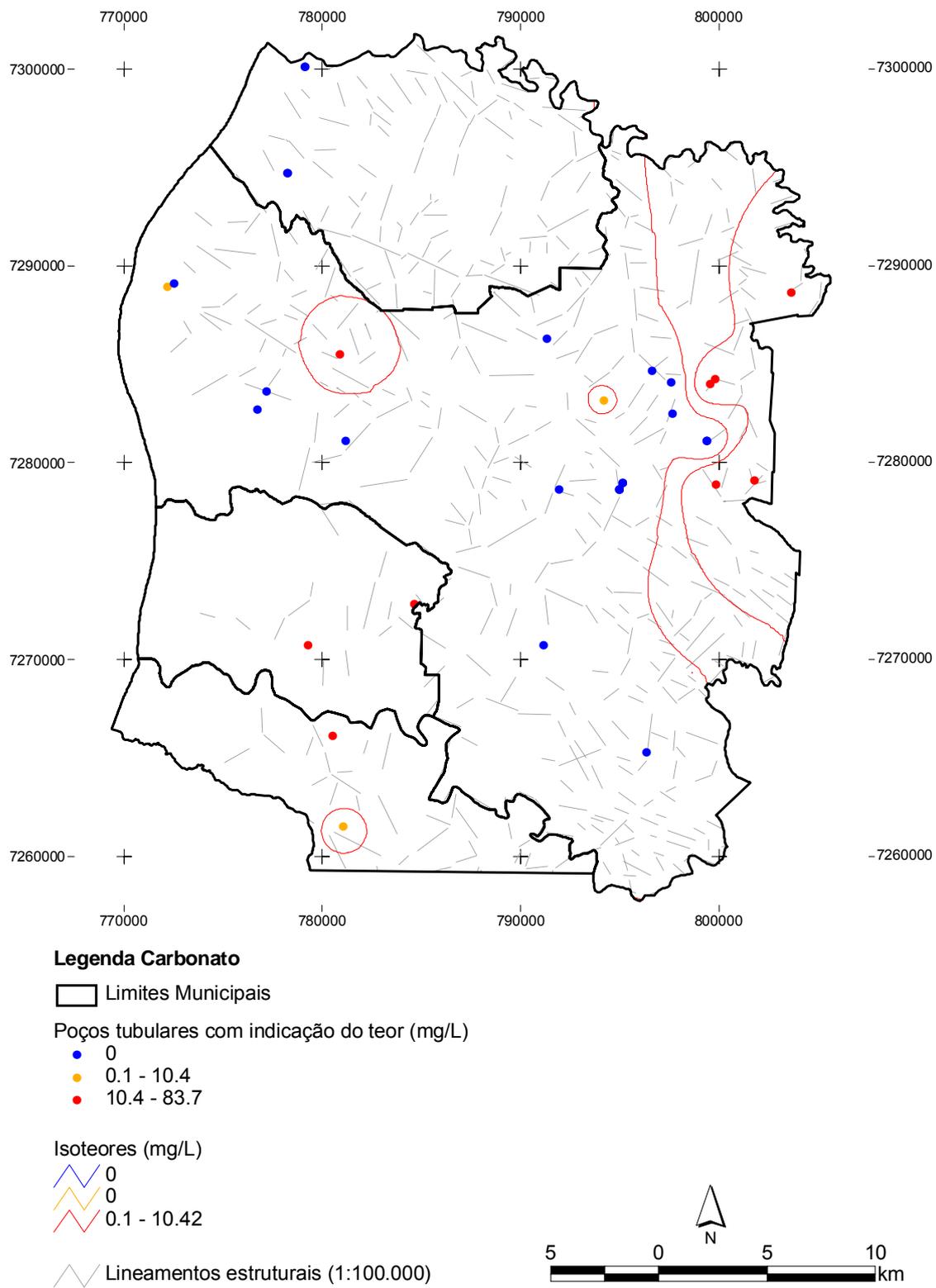


Figura 71 - Mapa com a distribuição espacial de isotores do CO_3^{2-}

4.3.3.3 Cloreto

Íon muito solúvel e estável, não causa redução ou oxidação do meio. Em concentrações acima de 250 mg/L comunica sabor salgado à água, porém não é prejudicial à saúde, mesmo em concentrações da ordem de 1000 mg/L. Teores elevados são prejudiciais para muitas plantas e tornam a água corrosiva.

A quantidade de Cl^- nas águas naturais, em geral, está associada ao Na^+ . A ocorrência deste íon na água está associada a intrusões salinas em zonas costeiras, passagem da água por rochas sedimentares formadas em ambiente marinho, infiltração de água e lixiviação de solos em ambientes de clima árido, solubilização de depósitos de halita ou outro evaporito, além de aerossóis marinhos (HINDI, 1999).

O aumento dos teores de Cl^- está relacionado no ambiente urbano com o processo de tratamento de água para abastecimento público, agente na produção de papéis, clorados de limpeza, desinfetantes, plásticos, solventes, produtos de petróleo, têxteis, anti-sépticos, tintas, clorofórmios e tubos de PVC (LICHT, 2001).

A estatística univariada do cloreto é apresentada na Figura 72. A distribuição espacial do cloreto é apresentada na Figura 73.

Dados estatísticos do cloreto (mg/L)	
Número de dados	34
Valor Mínimo	0,6
Valor Máximo	49,0
Média	7,4
Mediana	5,3
Moda	7,0

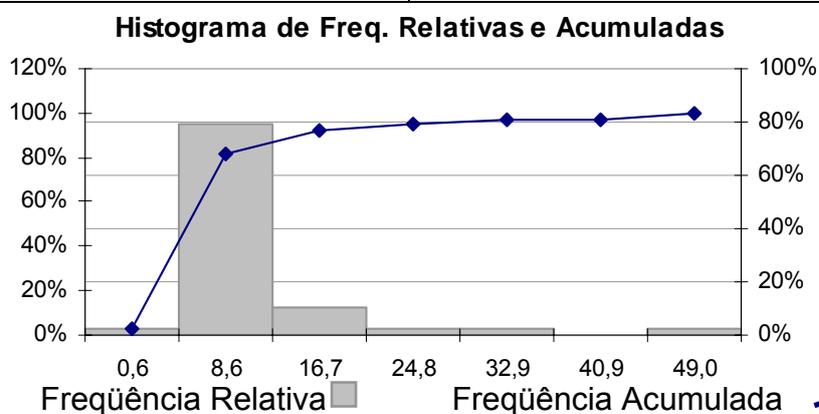


Figura 72- Estatística univariada do Cl^-

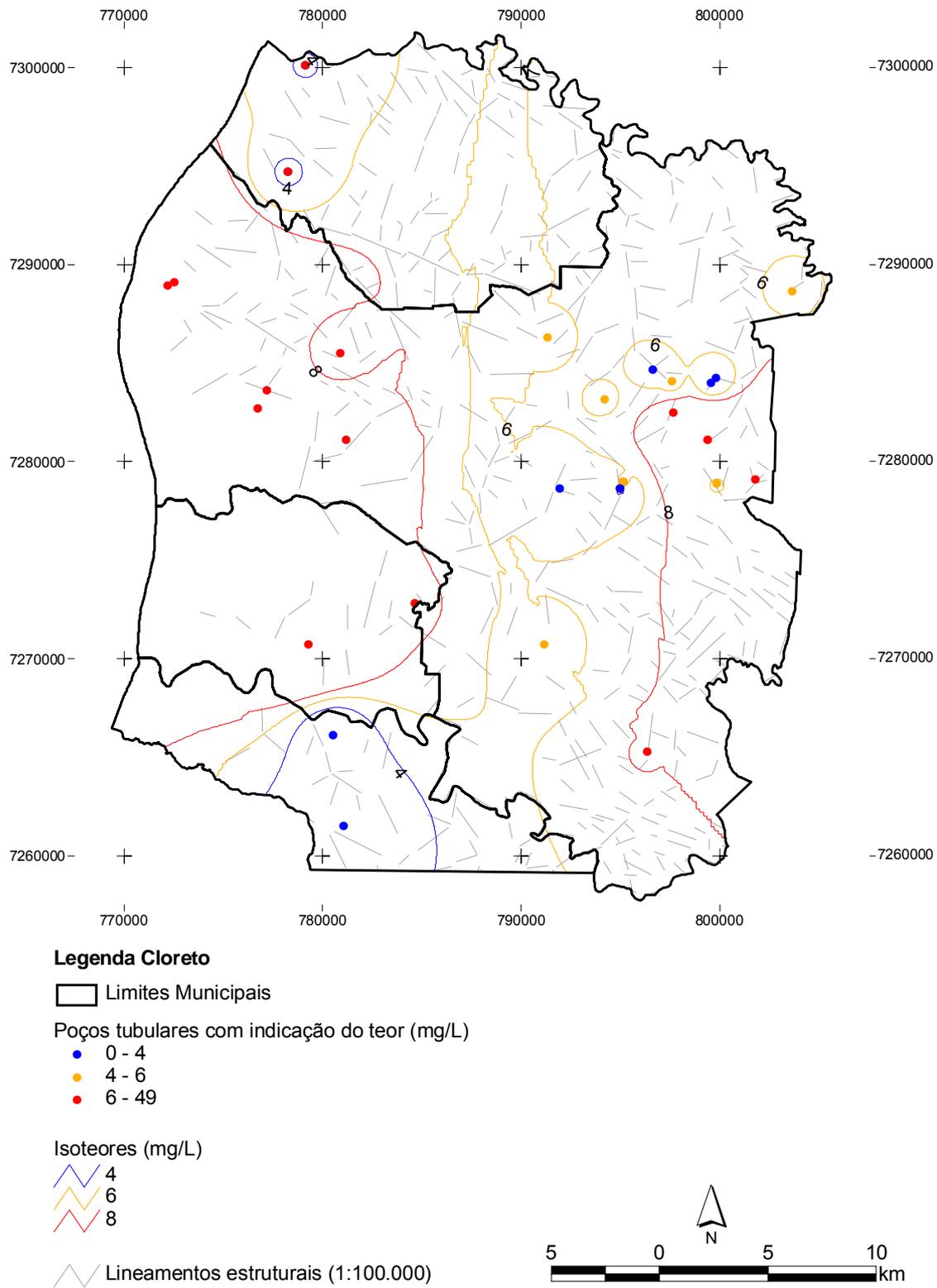


Figura 73 - Mapa com a distribuição espacial de isotopes do Cl⁻

4.3.3.4 Fluoreto

Nas águas, o teor de F^- de até 1,5 mg/L é benéfico à saúde, prevenindo cáries dentárias principalmente em crianças. Acima deste teor causa fluorose dental e deformação dos ossos (CPRM, 2000).

O F^- é liberado durante os processos de intemperismo e ocorre em solução principalmente na forma de F^- . O íon F^- substitui a hidroxila (OH^-) em minerais como micas, anfibólios, apatitas e argilas.

A estatística univariada do fluoreto é apresentada na Figura 74. A distribuição espacial do fluoreto é apresentada na Figura 75.

Dados estatísticos do fluoreto (mg/L)	
Número de dados	34
Valor Mínimo	0,0
Valor Máximo	1,6
Média	0,2
Mediana	0,1
Moda	0,1

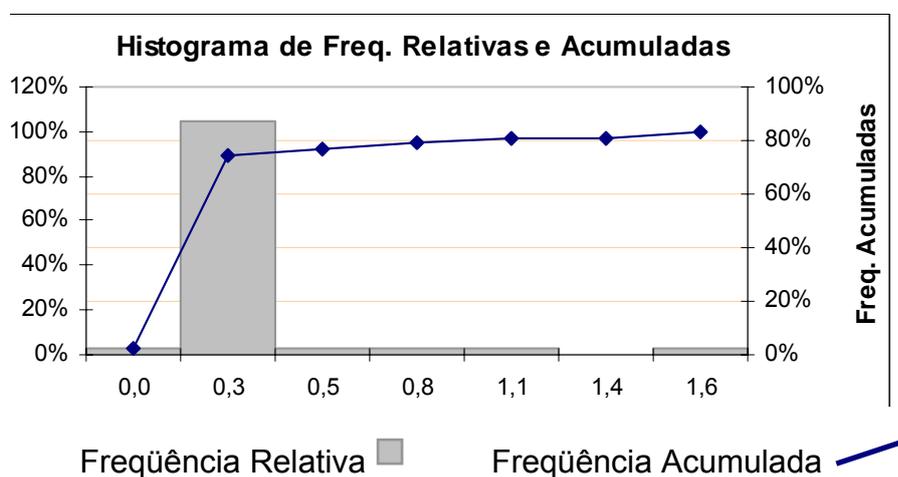


Figura 74 - Estatística univariada do F^-

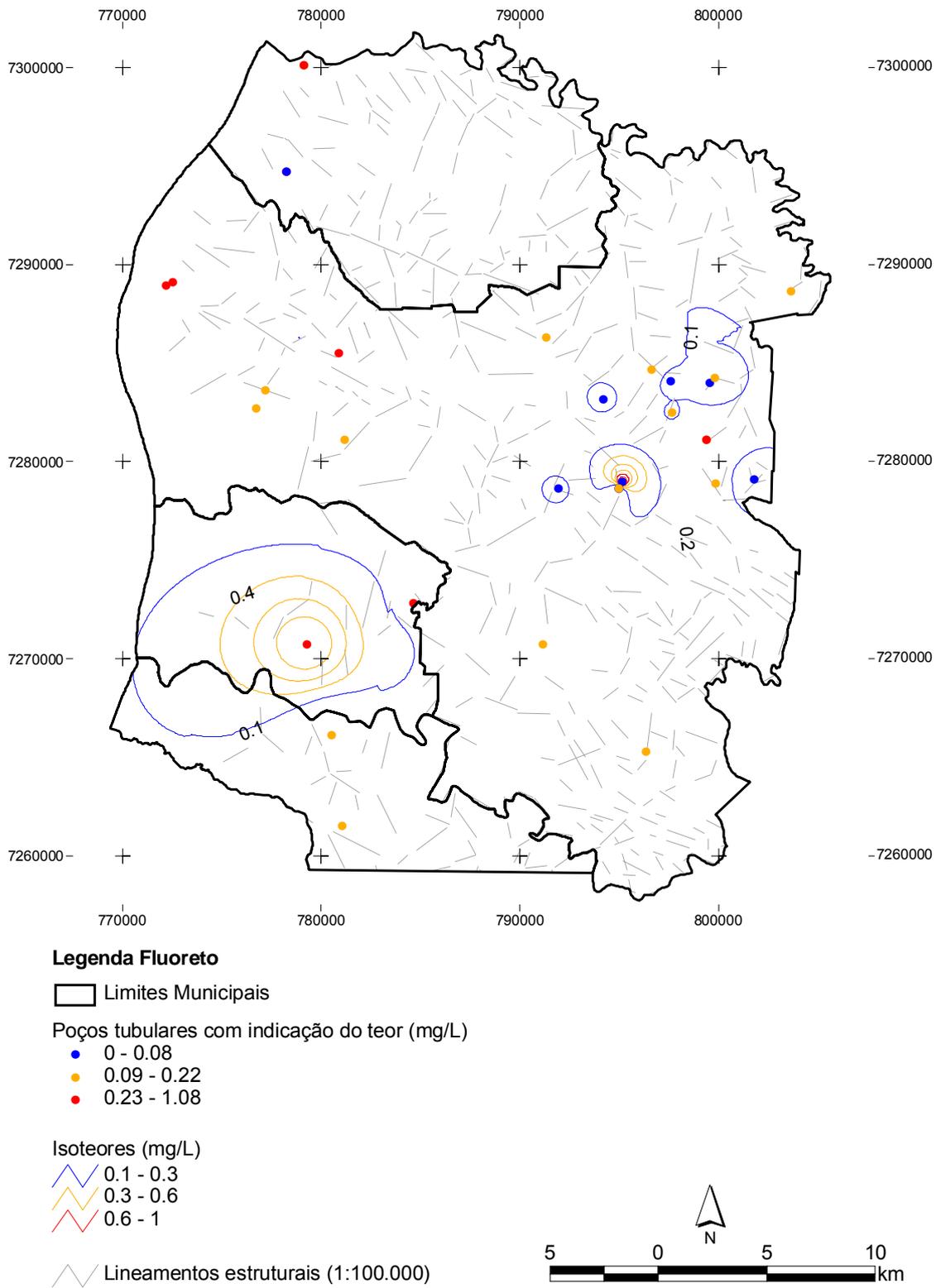


Figura 75 - Mapa com a distribuição espacial de isotopes do F⁻

4.3.3.5 Sulfato

O S (enxofre) está distribuído na crosta, tanto em rochas ígneas como sedimentares, na forma de sulfetos (S^{2-}) metálicos. Em contato com a água, em ambiente oxidante, esses sulfetos se transformam em sulfatos (SO_4^{2-}) que são solubilizados e lixiviados. As mais importantes fontes de SO_4^{2-} estão nos depósitos de gesso e anidrita (HEM, 1970). Podem ser consideradas como fonte de SO_4^{2-} , nas águas naturais, os efluentes industriais e as chuvas ácidas (HINDI, 1999).

A estatística univariada do sulfato é apresentada na Figura 76. A distribuição espacial do íon sulfato é apresentada na Figura 77.

Dados estatísticos do sulfato (mg/L)	
Número de dados	34
Valor Mínimo	0,0
Valor Máximo	125,0
Média	8,5
Mediana	1,0
Moda	1,0

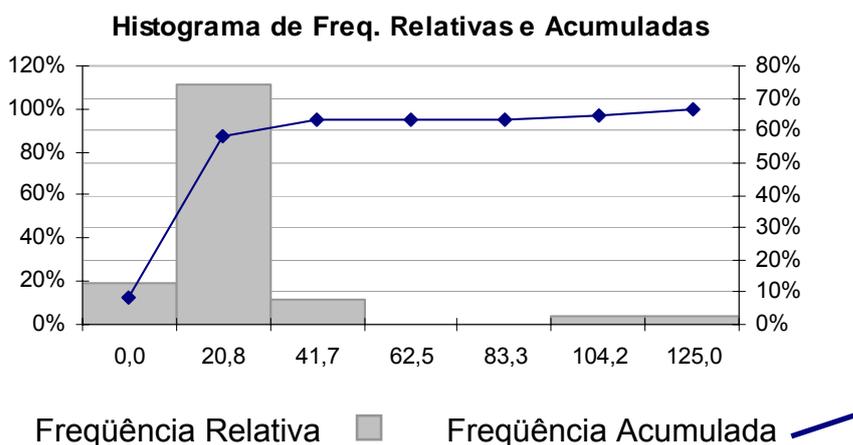


Figura 76 - Estatística univariada do SO_4^{2-}

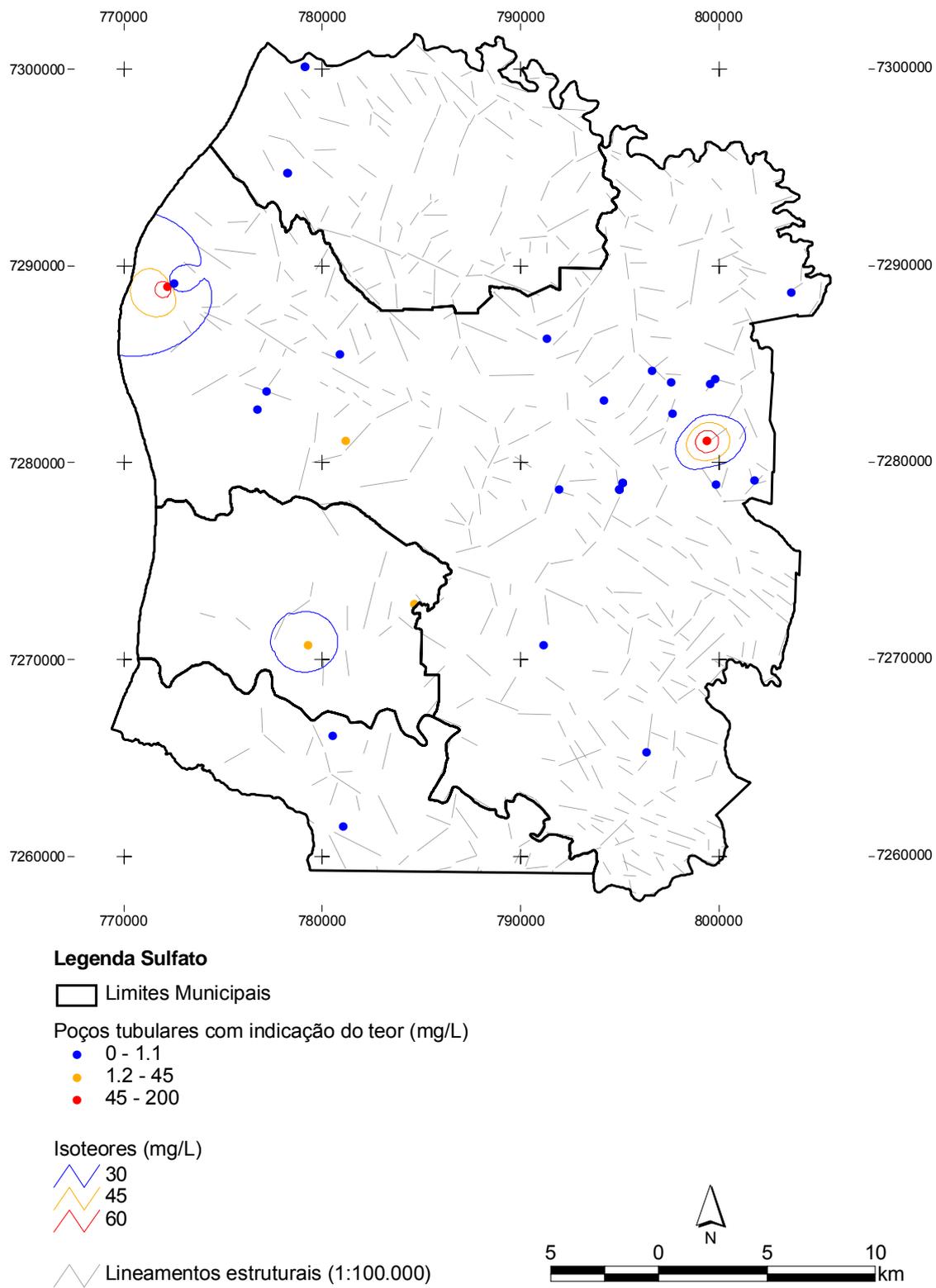


Figura 77 - Mapa com a distribuição espacial de isotopes de SO_4^{-2}

4.3.3.7 Sílica

O termo sílica, que significa o óxido SiO_2 , é utilizado freqüentemente ao se referir ao silício em águas naturais, mas a forma correta é hidratada, representada como H_4SiO_4 ou $\text{Si}(\text{OH})_4$ (HEM, 1985).

O silício é o segundo elemento mais abundante da Terra e, a SiO_2 é um dos principais constituintes das rochas ígneas, metamórficas e sedimentares que, na forma de quartzo é um dos minerais mais resistentes ao intemperismo químico, com solubilidade baixa em condições ambientais. A sílica amorfa como chert, opala e calcedônia, são mais solúveis (HEM, 1985).

A concentração de SiO_2 comumente observada em águas naturais varia de 1 a 30 mg/L com mediana de 14 mg/L. Nas águas subterrâneas a mediana é de 17mg/L. Concentrações elevadas encontradas em poços estão relacionadas ao tipo de rocha e temperatura da água (HEM, 1985).

A estatística univariada da sílica é apresentada na Figura 78. A distribuição espacial do íon sílica é apresentada na Figura 79.

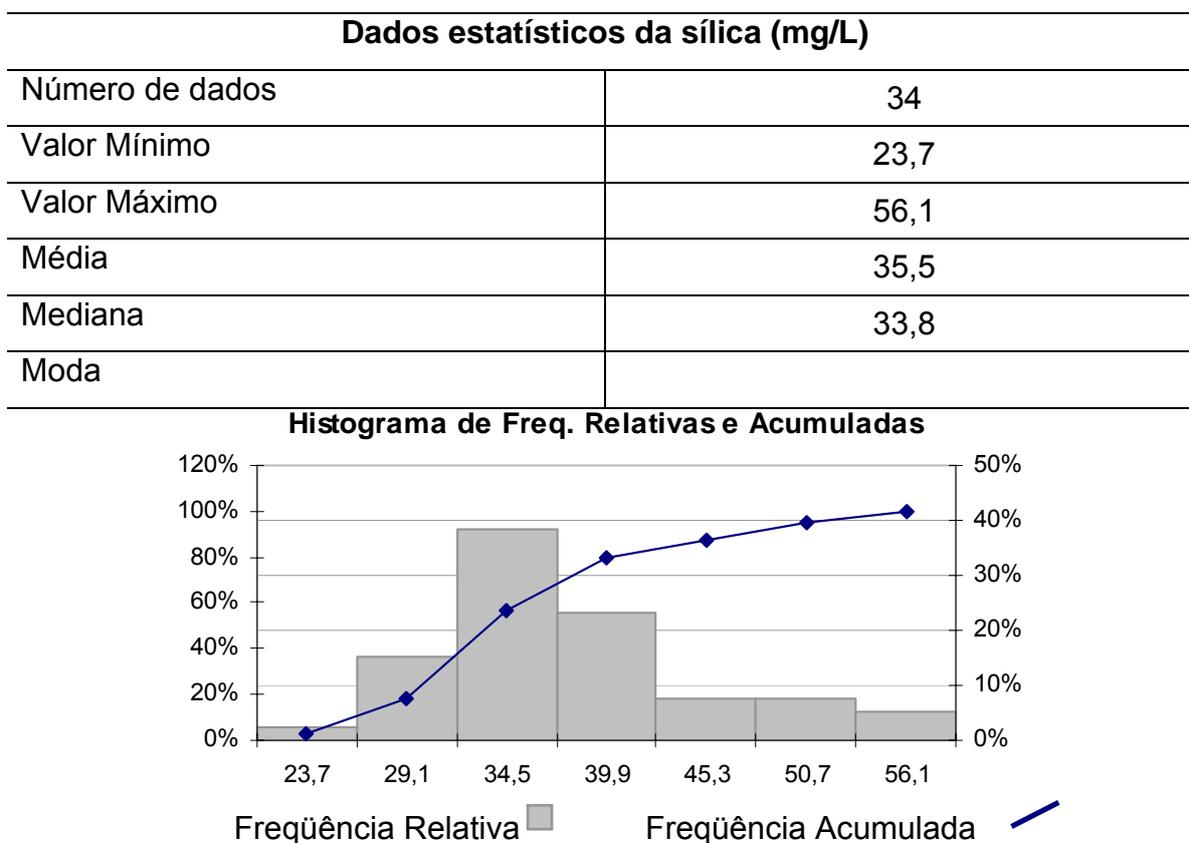


Figura 78 - Estatística univariada da SiO_2

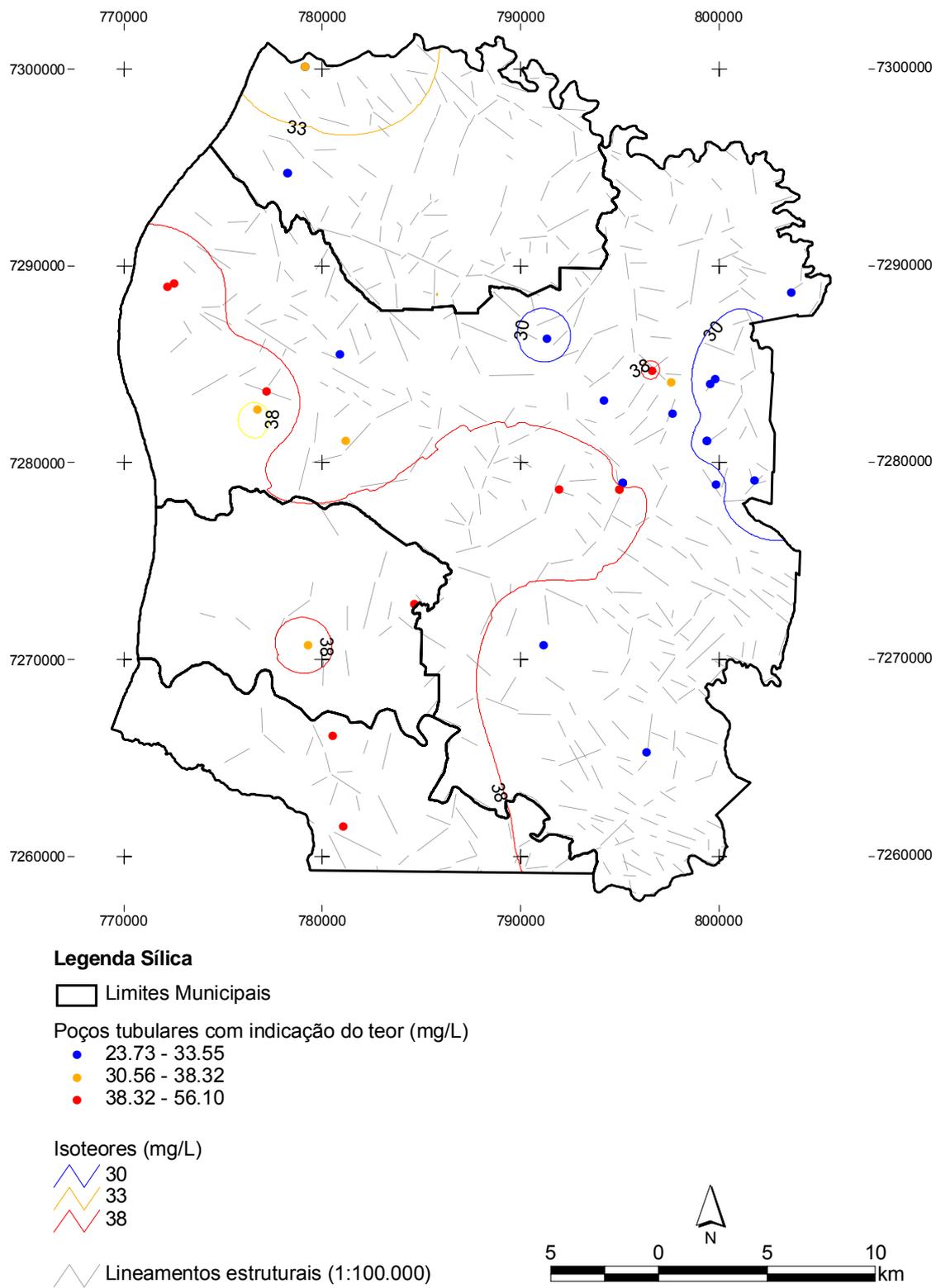


Figura 79 - Mapa com a distribuição espacial de isotores da SiO_2

4.3.3.8 Cálcio

O cálcio é liberado durante o intemperismo dos plagioclásios, piroxênios, anfibólio, epidotos, carbonatos, sulfatos em rochas básicas e ultrabásicas. Os minerais de cálcio intemperizam-se facilmente, dissolvem-se em meio ácido e podem recristalizar na forma de calcita, aragonita, dolomita, granada, fosfato e apatita (MINEROPAR, 2001).

Os íons de Ca^{+2} e Mg^{+2} são incorporados à água em concentrações que dependem das quantidades e formas disponíveis, do tempo e modo de interação entre água e a rocha e, das condições ambientais, todas ligadas às concentração descritas a seguir (HEM, 1970; KRAUSKOPF, 1972):

- pH: quanto mais ácido o meio, mais intensa é a dissolução, ocorrendo precipitação em pH básico;

- CO_2 : o aumento da concentração de CO_2 aumenta a acidez, favorecendo a dissolução e, no caso inverso, precipitação;

- temperatura: o aumento da temperatura diminui a solubilidade, devido a diminuição da concentração do CO_2 ;

A estatística univariada do cálcio é apresentada na Figura 80. A distribuição espacial do íon cálcio é apresentada na Figura 81.

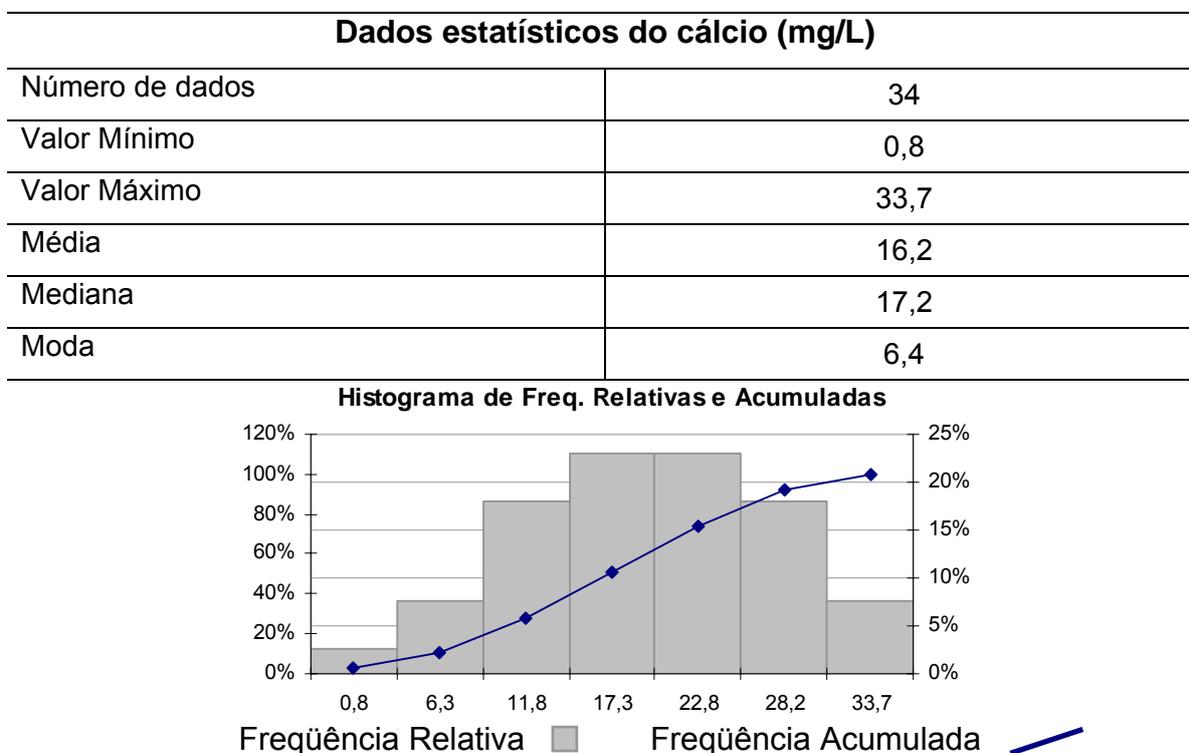


Figura 80 - Estatística univariada do Ca^{2+}

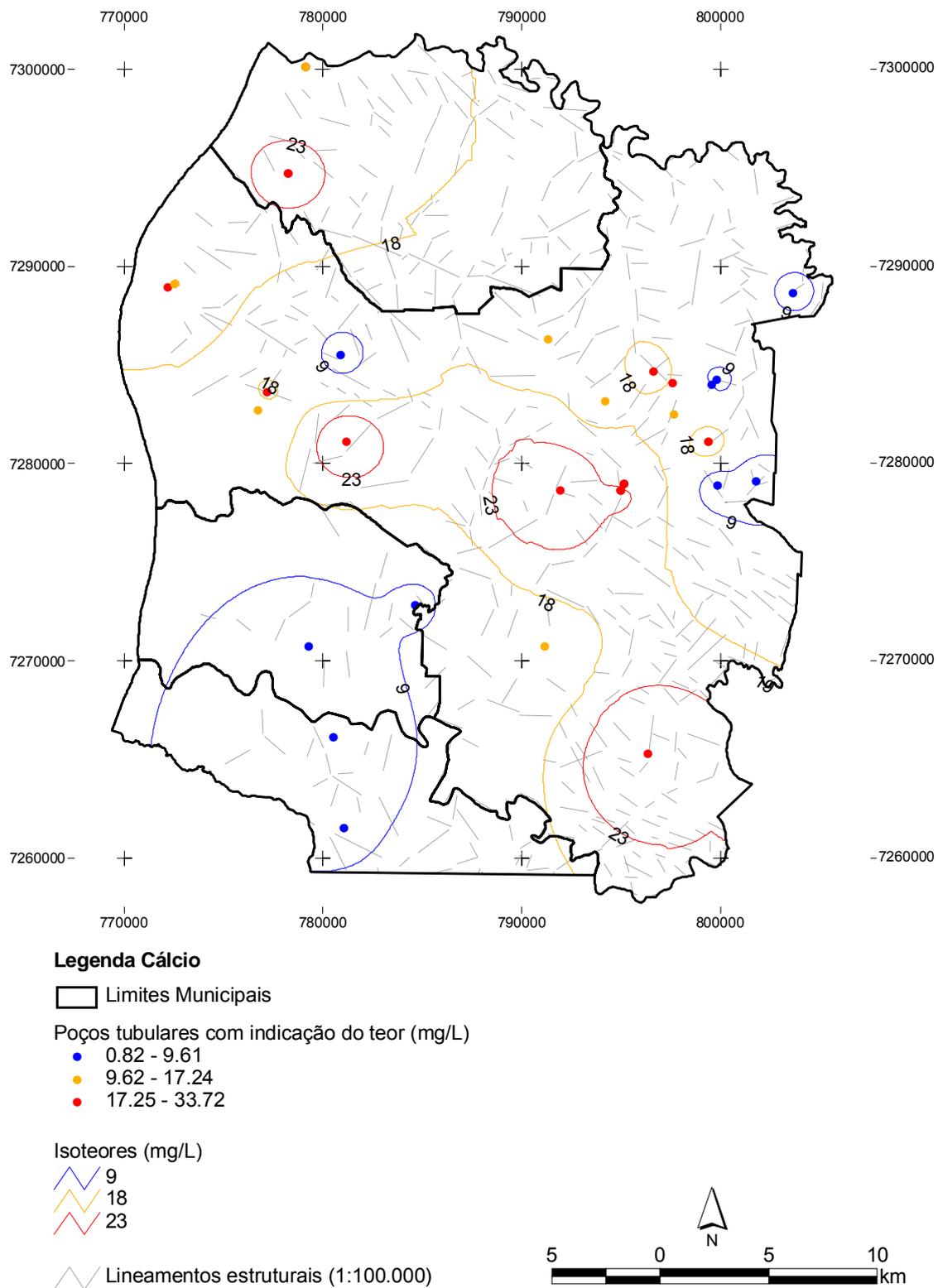


Figura 81 - Mapa com a distribuição espacial de isotores do Ca^{2+}

4.3.3.9 Magnésio

O Mg^{2+} apresenta propriedades similares ao Ca^{2+} , é um dos principais responsáveis pela dureza da água, porém é mais solúvel e difícil de precipitar. Quando em solução tem a tendência de nela permanecer, daí o enriquecimento dos seus sais nas águas dos oceanos (Custodio, Llamas, 2001).

O Mg^{2+} está presente nos silicatos, óxidos e carbonatos. Os íons de Mg^{2+} são menores do que os de Ca^{2+} e, por isso, têm uma densidade de carga mais forte e maior tração sobre as moléculas de água.

A estatística univariada do íon magnésio é apresentada na Figura 82. A distribuição espacial do íon magnésio é apresentada na Figura 83.

Dados estatísticos do cálcio (mg/L)	
Número de dados	34
Valor Mínimo	0,8
Valor Máximo	33,7
Média	16,2
Mediana	17,2
Moda	6,4

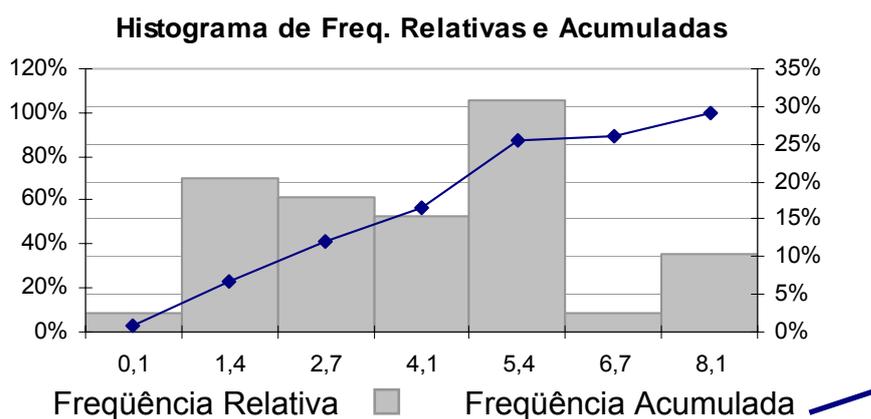


Figura 82 - Estatística univariada do Mg^{2+}

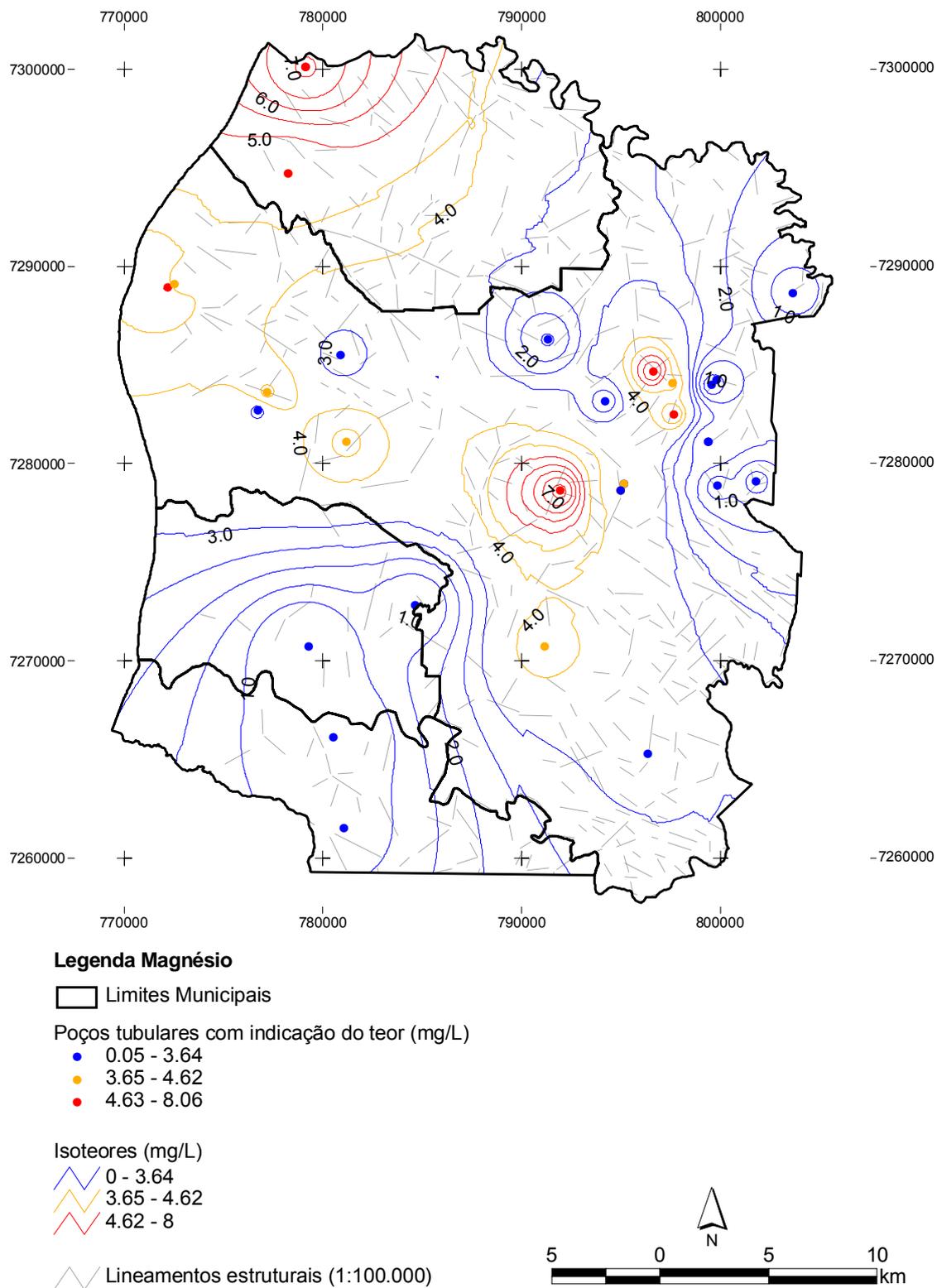


Figura 83 - Mapa com a distribuição espacial de isotores do Mg^{2+}

4.3.3.10 Sódio

O Na^+ é um dos metais alcalinos mais abundantes nas águas subterrâneas, possui solubilidade elevada e difícil precipitação.

Em geral, há um aumento gradativo dos teores de Na^+ das águas subterrâneas a partir da zona de recarga do aquífero em direção às suas porções mais confinadas ou dos seus exutórios (CPRM, 2000).

O Na^+ é retido por adsorção na superfície de minerais, especialmente por minerais que apresentam alta capacidade de troca catiônica como as argilas. As fontes de Na^+ são: feldspatos (ortoclásio e microclínio), anfibólios, piroxênios, feldspatóides (nefelina e sodalita), rochas alcalinas e carbonatitos (CPRM, 2000).

A estatística univariada do sódio é apresentada na Figura 84. A distribuição espacial do íon sódio é apresentada na Figura 85.

Dados estatísticos do sódio (mg/L)	
Número de dados	34
Valor Mínimo	1,9
Valor Máximo	123,0
Média	27,5
Mediana	17,0
Moda	7,2

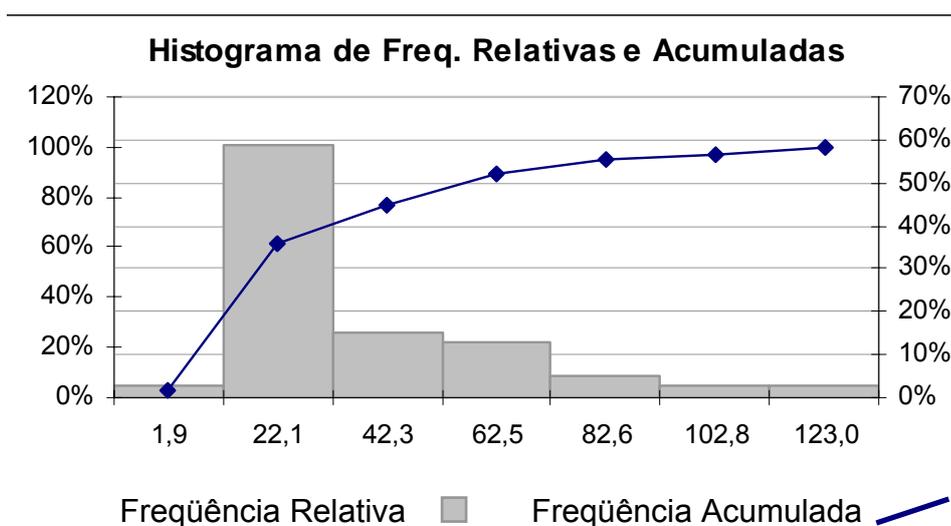


Figura 84 - Estatística univariada do Na^+

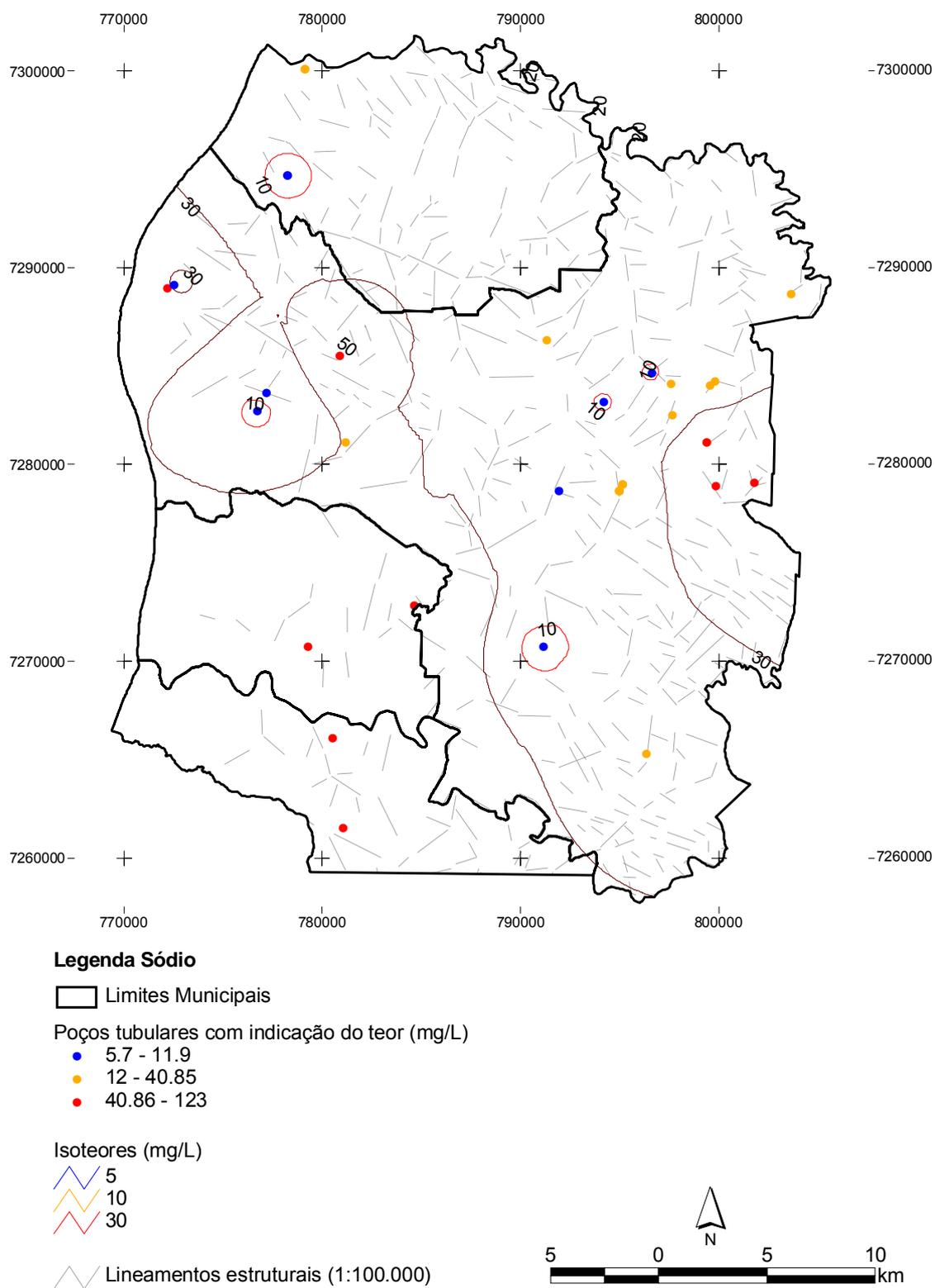


Figura 85 -Mapa com a distribuição espacial de isoteores do Na^+

4.3.3.11 Potássio

O K^+ ocorre em pequenas quantidades ou está ausente nas águas subterrâneas, devido a sua participação intensa em processos de troca iônica, além da facilidade de ser adsorvido pelos minerais de argila e, de seus sais serem bastante utilizados pelos vegetais (CPRM, 2000).

A quantidade de K^+ em águas naturais é muito baixa comparada ao Na^+ , porque este tende a ficar em solução desde que foi liberado da estrutura mineral, enquanto o K^+ é liberado com mais dificuldade, além de ser reincorporado na estrutura dos minerais de argila (HEM, 1970).

A estatística univariada do potássio é apresentada na Figura 86. A distribuição espacial do íon potássio é apresentada na Figura 87. A estatística univariada do potássio é apresentada na Figura 87.

Dados estatísticos do potássio (mg/L)	
Número de dados	34
Valor Mínimo	0,0
Valor Máximo	1,3
Média	0,5
Mediana	0,5
Moda	0,5

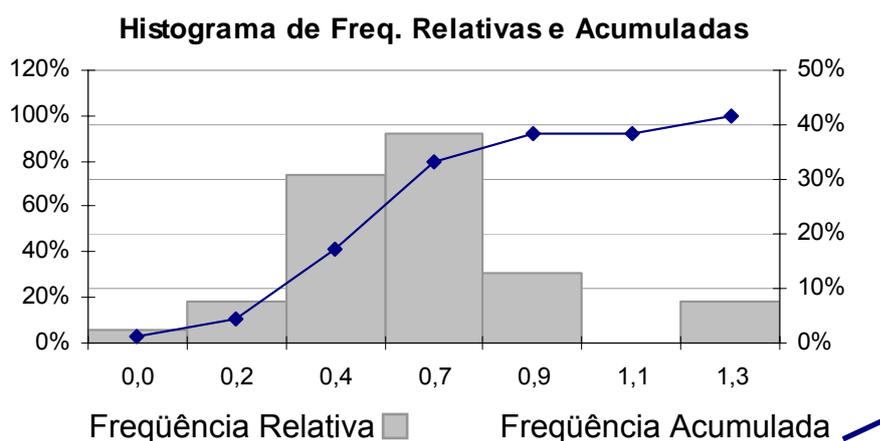


Figura 86 - Estatística univariada do cátion K^+

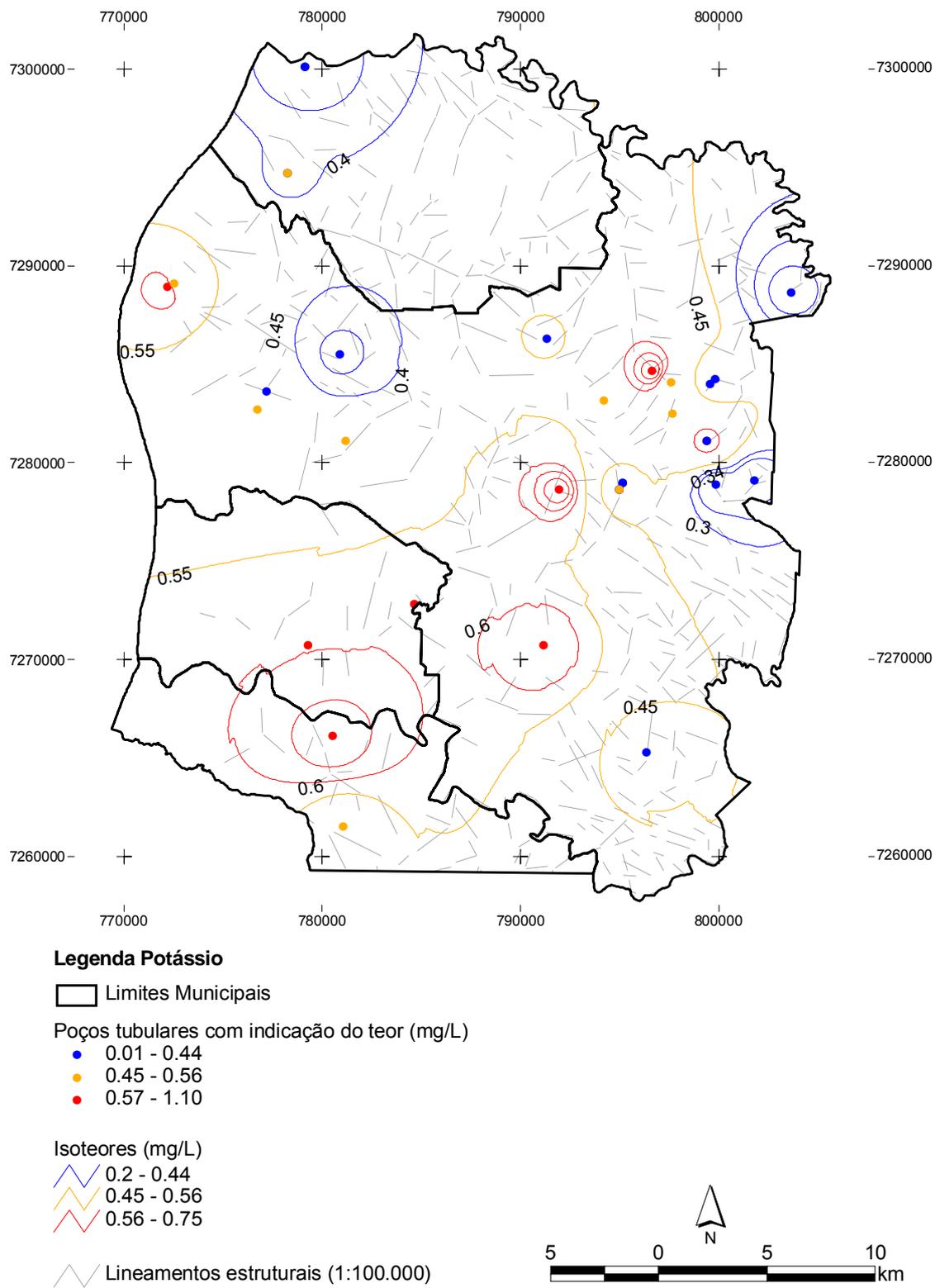


Figura 87 - Mapa com a distribuição espacial dos isotores do K^+

4.3.3.13 pH

A atividade iônica do hidrogênio em solução aquosa é controlada pelas reações químicas que produzem ou consomem hidrogênio (HEM, 1985).

A temperatura exerce um forte efeito no comportamento do pH, sendo que temperaturas elevadas aumentam a constante de equilíbrio da água (K_w) e, o valor do pH diminui. O pH da água pode ser afetado pela oxidação do ferro dissolvido, ou seja, o pH diminui com a oxidação e precipitação do ferro (HEM, 1985).

No local de estudo as análises dos poços situados em Entre Rios do Oeste e Pato Bragado apresentam pH maior que oito.

A estatística univariada do pH é apresentada na Figura 88. A distribuição espacial do pH é apresentada na Figura 89.

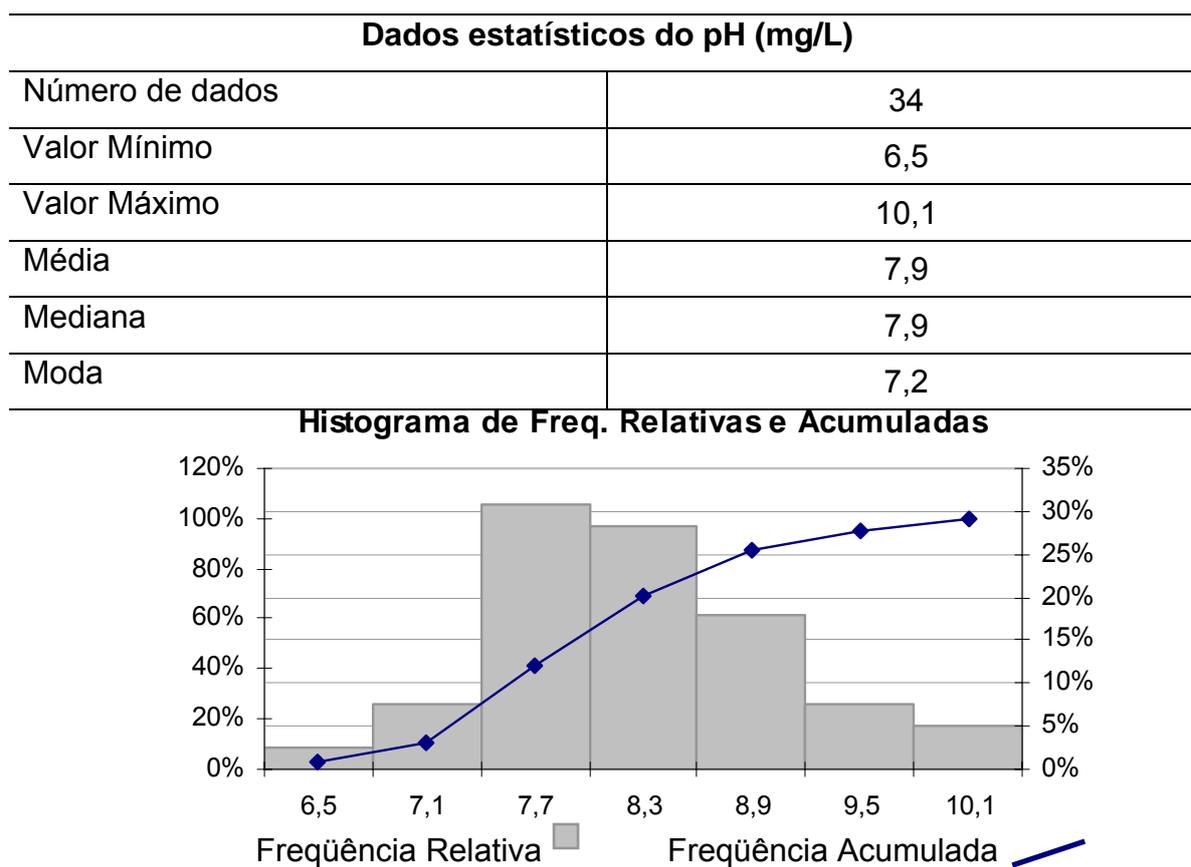


Figura 88 - Estatística univariada dos valores de pH.

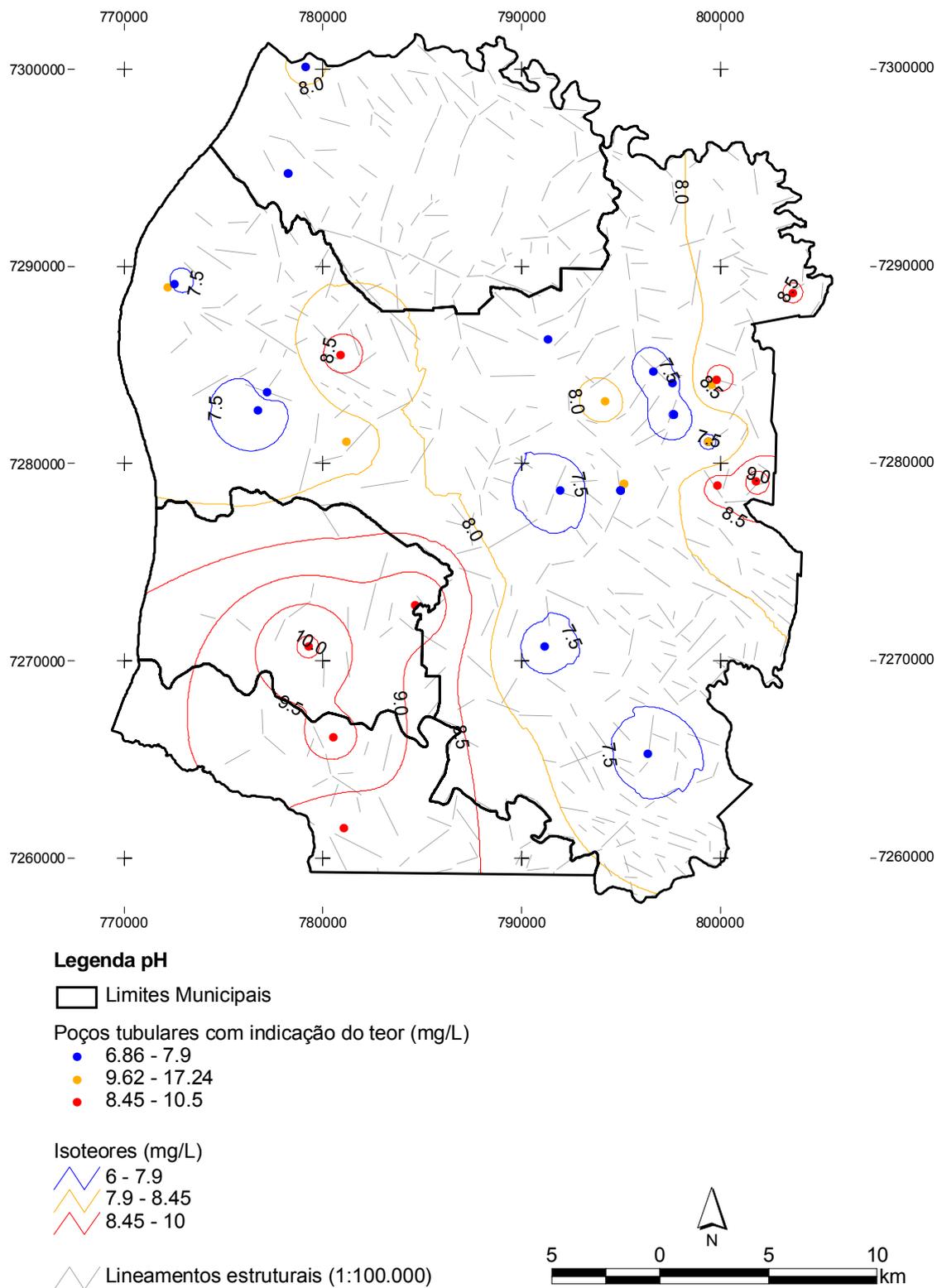


Figura 89 - Mapa com a distribuição espacial dos iso-valores do pH

4.3.3.14 Condutância específica

Condutância elétrica, ou condutividade é a capacidade de uma substância conduzir corrente elétrica. A condutividade elétrica aumenta com a elevação da temperatura, e quantidade de íons dissolvidos.

A estatística univariada da condutância específica é apresentada na Figura 90. A distribuição espacial da condutância específica é apresentada na Figura 91.

Dados estatísticos da condutância específica (μS)	
Número de dados	34
Valor Mínimo	34,8
Valor Máximo	1.479,0
Média	180,0
Mediana	124,9
Moda	-

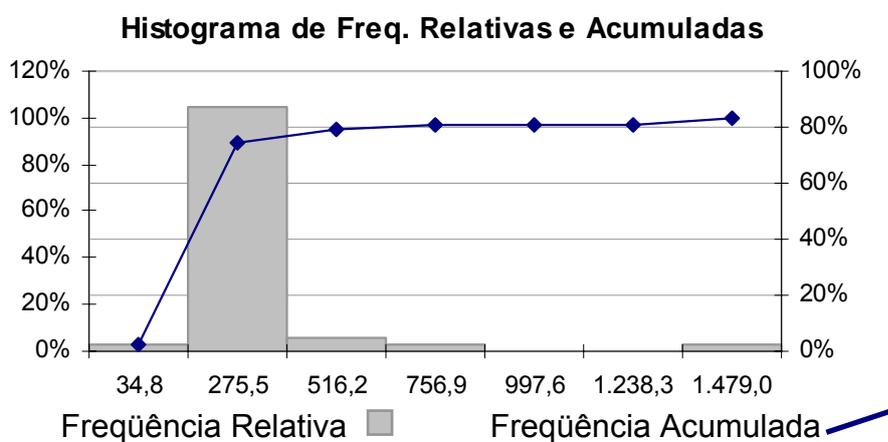


Figura 90 - Estatística univariada da condutância específica

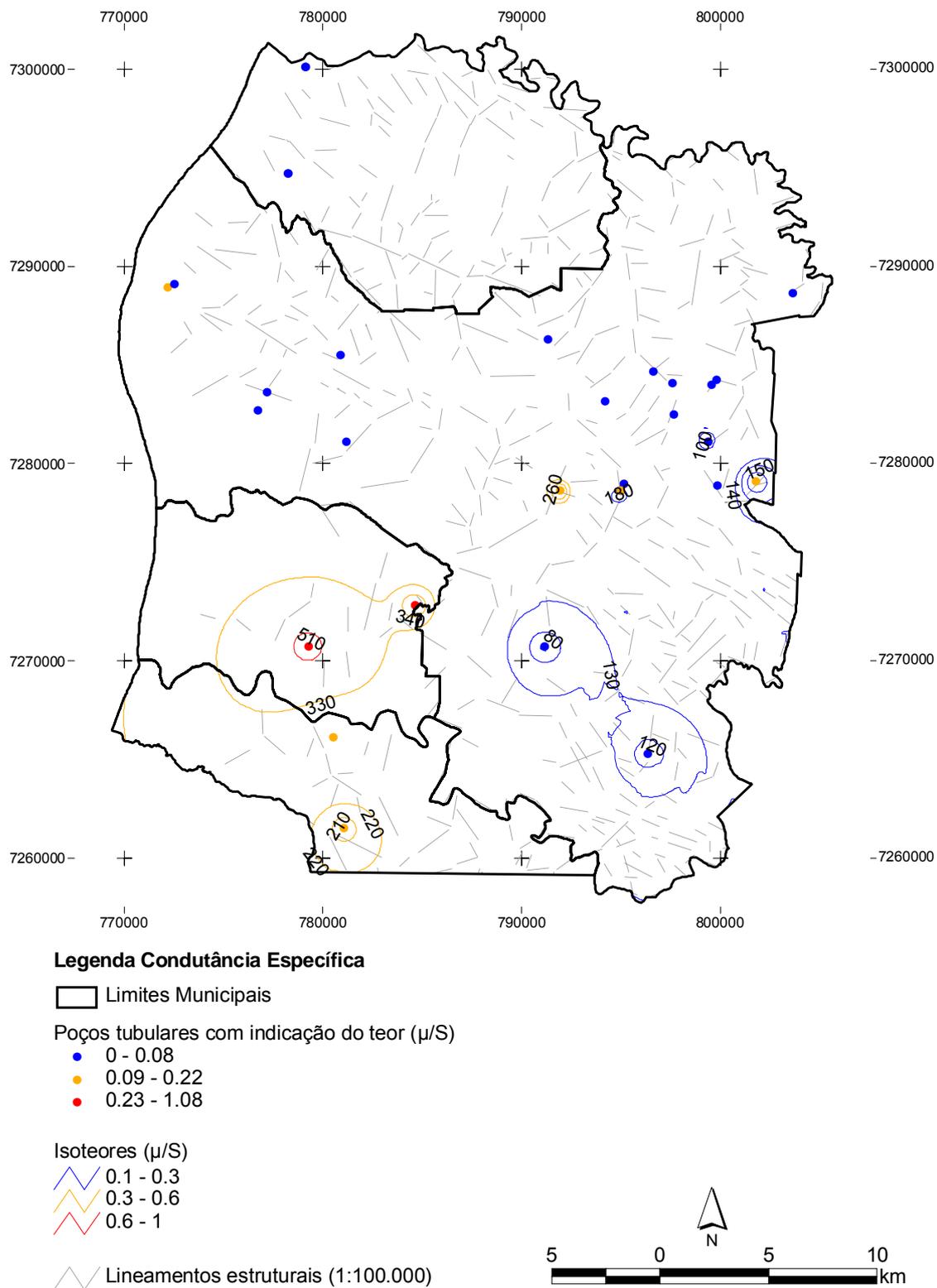


Figura 91 - Mapa com a distribuição espacial dos iso-valores da condutância específica

4.3.3.16 Sólidos totais dissolvidos

A concentração do material dissolvido na água é determinada a partir do peso do resíduo seco, resultante da evaporação, à temperatura fixa e constante seguida de secagem em estufa de uma alíquota da amostra de volume conhecido. A temperatura usada para determinação dos sólidos totais dissolvidos (STD) foi de 103°C.

Os valores analíticos dos STD foram determinados pelo método gravimétrico e podem apresentar discrepâncias quando comparados com a soma das concentrações de cátions e ânions. Esta discrepância normalmente é devida à transformação de HCO_3^- em CO_3^{2-} pela perda de CO_2 .

A estatística univariada dos STD é apresentada na Figura 92. A distribuição espacial dos STD é apresentada na Figura 93.

Dados estatísticos dos sólidos totais dissolvidos (mg/L)	
Número de dados	34
Valor Mínimo	32,0
Valor Máximo	331,0
Média	91,6
Mediana	62,0
Moda	32,0

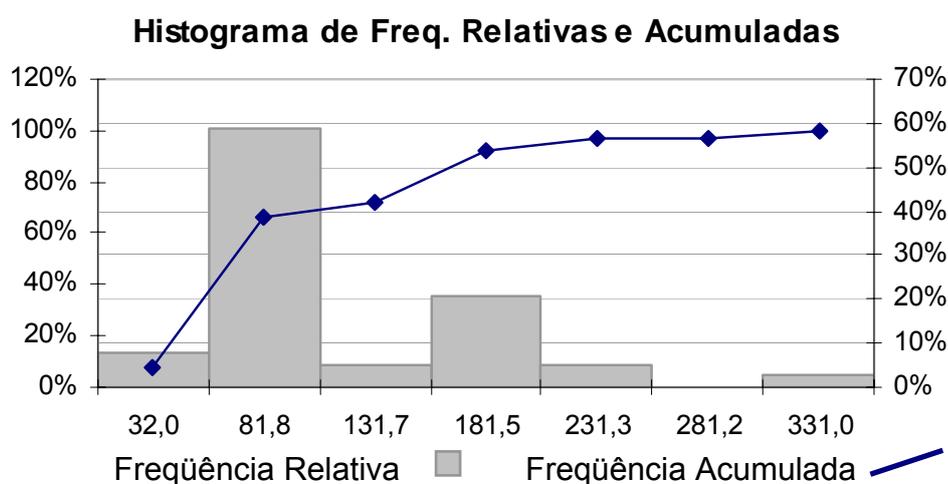


Figura 92 - Estatística univariada dos sólidos totais dissolvidos calculados

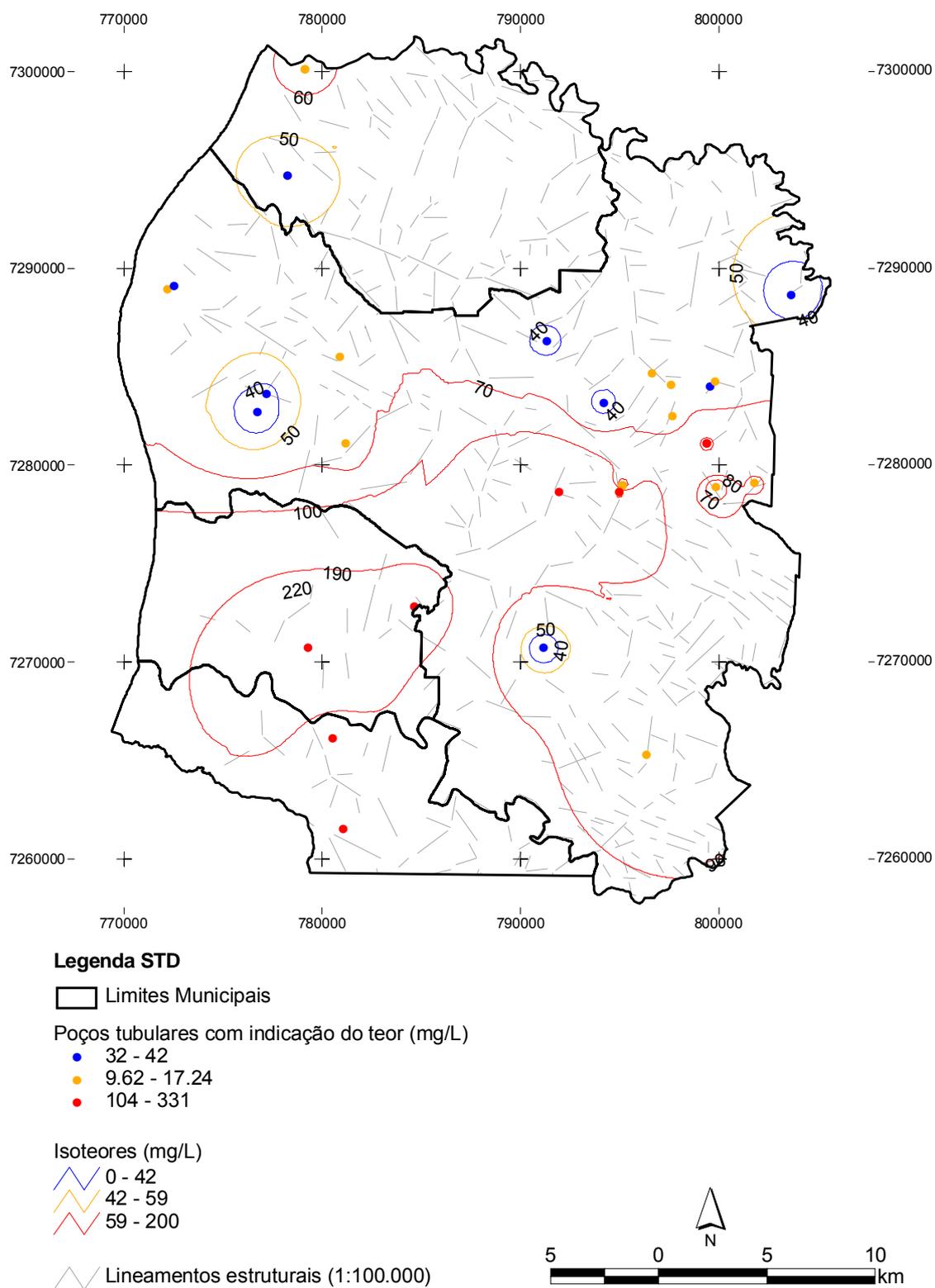


Figura 93 - Mapa com a distribuição espacial das isotores dos STD calculados

4.3.3.18 Temperatura

A estatística do univariada da temperatura é apresentada na Figura 94. A distribuição espacial da temperatura é apresentada na Figura 95.

Observa-se que, nos municípios de Pato Bragado e Entre Rios Do Oeste, a temperatura das águas aumenta até 2 °C. Este aumento pode estar associado a mistura de água entre o ASG e o Aquífero Botucatu, uma vez que este último, apresenta temperaturas elevadas na área da BPIII, inclusive com aproveitamento de seu potencial termal.

Dados estatísticos da temperatura (°C)	
Número de dados	34
Valor Mínimo	22,0
Valor Máximo	26,8
Média	23,7
Mediana	23,1
Moda	23,0

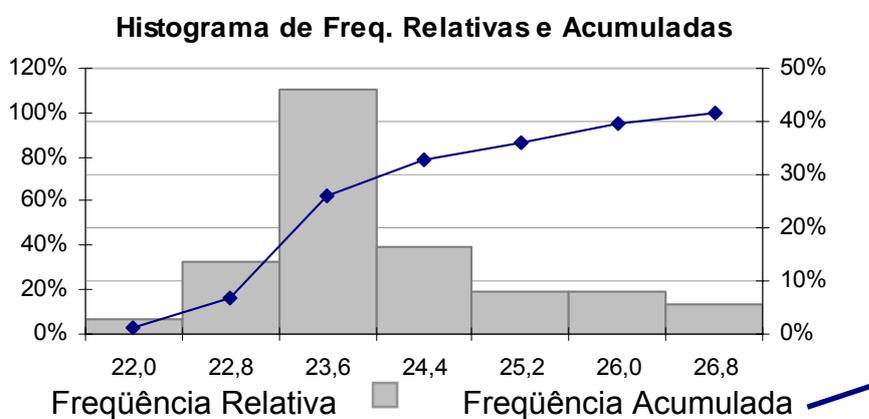


Figura 94 - Estatística univariada da temperatura

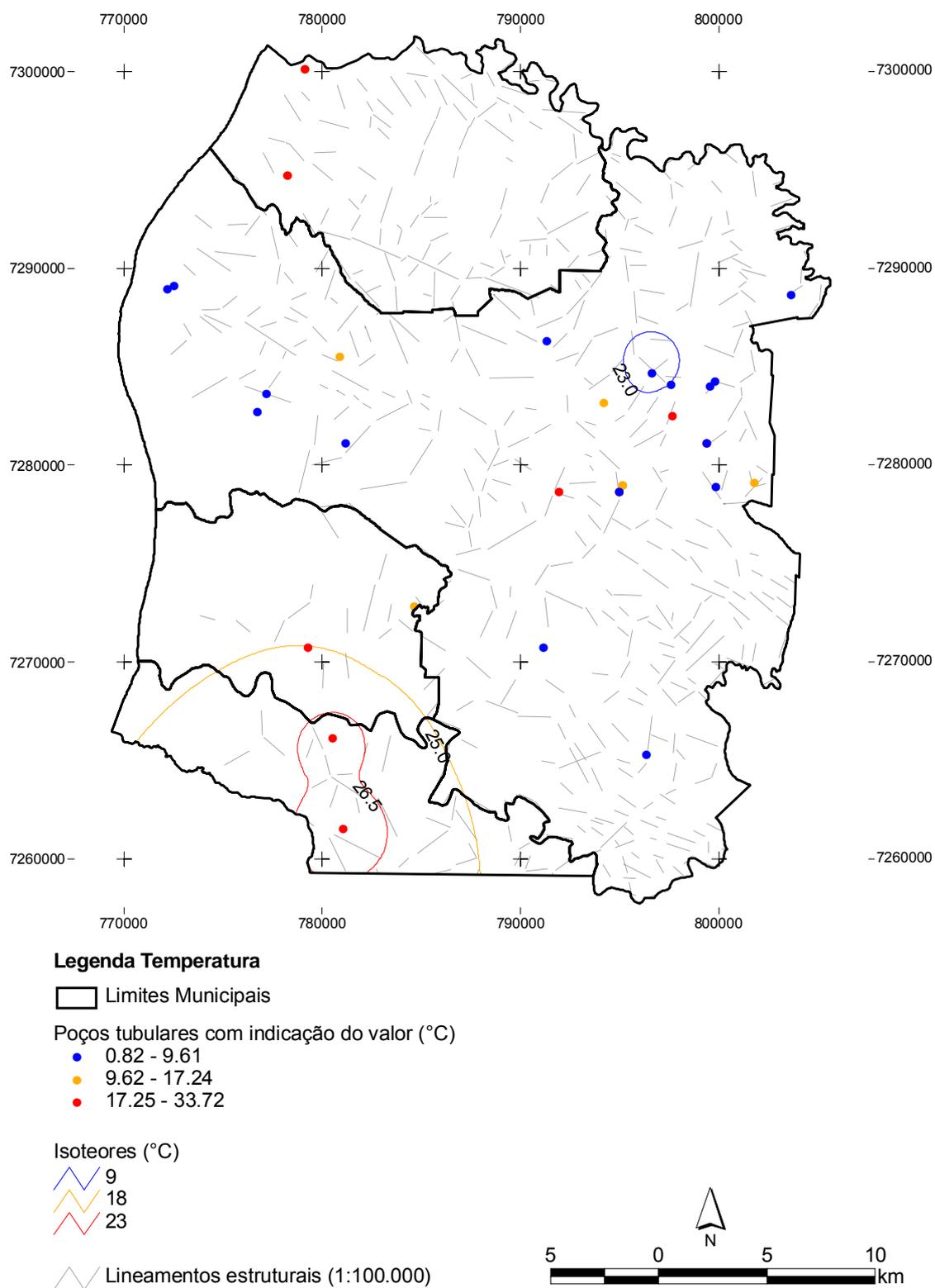


Figura 95 - Mapa com a distribuição espacial das iso-valores da temperatura (°C)

4.3.4 Relações potenciométricas e mistura de águas entre os aquíferos Serra Geral e Botucatu na área da BPIII

Na área de estudo, conforme apresentado, predominam poços com águas do tipo bicarbonatadas cálcicas. Entretanto, nos municípios de Marechal Cândido Rondon, Pato Bragado e Entre Rios do Oeste, poços tubulares que captam o Aquífero Serra Geral apresentam tipologia química bastante diferenciada do padrão hidroquímico do ASG.

Nesta abordagem foram selecionados apenas quatro poços do ASG que apresentaram tipologia química diferente do padrão regional, bicarbonatada cálcica, e um poço que capta o aquífero Botucatu.

Na Figura 96 é apresentado o mapa com a localização dos 05 poços abordados neste estudo:

- Poço 01 BOTUCATU: Localizado em MCR, capta o aquífero Botucatu.
- Poço 02 (MCR): localizado em MCR, capta o ASG.
- Poço 03 (MCR 1): localizado em MCR, capta o ASG.
- Poço 04 (PB): localizado em Pato Bragado, capta o ASG.
- Poço 05 (PB 1): localizado em Pato Bragado, capta o ASG.

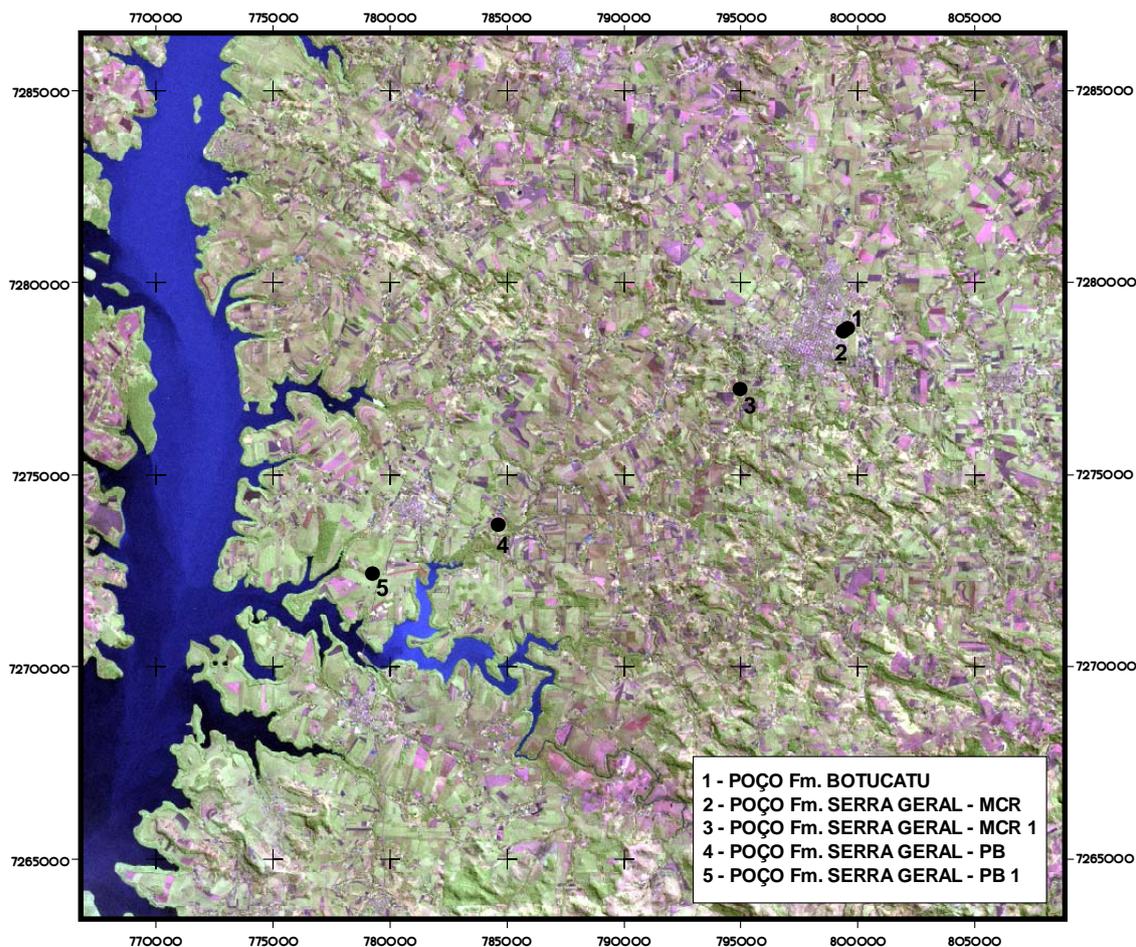


Figura 96 - Cena LANDSAT TM7 e localização dos poços utilizados na análise

As características hidrodinâmicas dos poços aqui utilizados são descritas na Tabela 10.

Tabela 10 - Parâmetros hidrodinâmicos dos poços utilizados

Código	Cota (m.s.n.m.)	Nível Estático	Cota Potenciométrica (m.s.n.m.)
Poço 01 - BOTUCATU	395	- 91,5 m	303,5
Poço 02 – MCR (ASG)	392	- 94,0 m	298,0
Poço 03 - MCR 1 (ASG)	303	- 21,8 m	281,2
Poço 04 – PB (ASG)	228	- 5,0 m	223,0
Poço 05 - PB 1 (ASG)	245	- 33,7 m	211,3

4.3.4.1 Tipologia química do Aquífero Botucatu (Aquífero Guarani) na BPIII

Na Bacia do Paraná III são poucos os poços perfurados até o Aquífero Botucatu. Isto se deve principalmente a dois fatores: a espessura de até 920

metros de basaltos (Formação Serra Geral) e o alto teor de íons dissolvidos na água subterrânea, condicionando sua aplicação principal à indústria do turismo de águas termais.

Os três poços tubulares profundos que captam o Aqüífero Botucatu (MCR, Itaipulândia e Foz do Iguaçu) aqui utilizados, apresentam a seguinte tipologia química:

- Marechal Cândido Rondon: água sulfatada sódica
- Itaipulândia: água sulfatada sódica.
- Foz do Iguaçu: cloretada-sulfatada sódica.

Os poços de Marechal Cândido Rondon, Itaipulândia e Foz do Iguaçu estão respectivamente plotados em vermelho, azul e verde, no diagrama de Piper da Figura 97.

As águas do aqüífero Botucatu aqui descritas caracterizam a porção confinada do aqüífero, conforme Hindi (2007).

Neste estudo foi utilizado o poço de Marechal Cândido Rondon (Poço 01 – BOTUCATU) para correlação química e potenciométrica entre os aqüíferos.

Com o intuito de verificar a potencimetria regional do aqüífero Botucatu, verificou-se que, em outros dois poços da BPIII (Itaipulândia e Foz do Iguaçu) a potencimetria do aqüífero Botucatu se mantém acima da cota potenciométrica do ASG. As cotas potenciométricas nos poços perfurados que captam o Aqüífero Botucatu na BPIII, são 288m e 240m, para os poços situados nos municípios de Itaipulândia e Foz do Iguaçu, respectivamente.

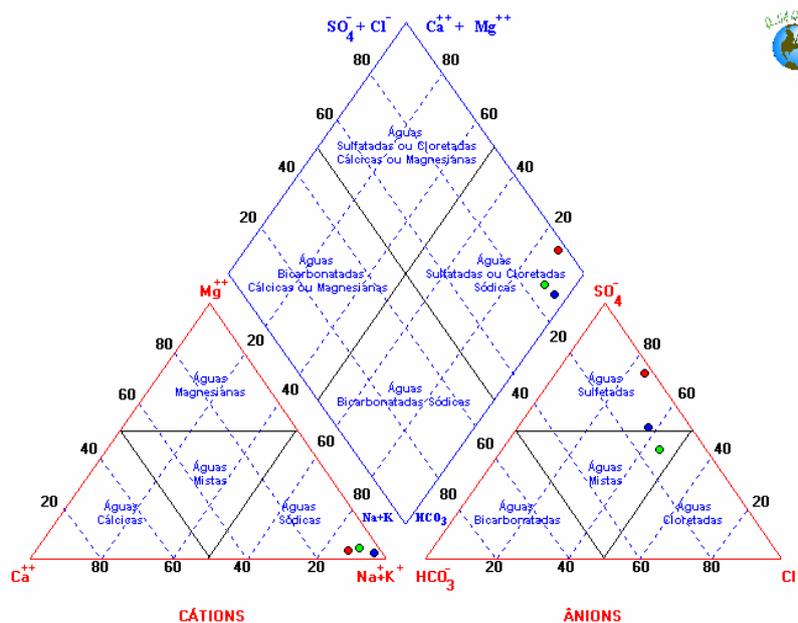


Figura 97 - Diagrama de Piper dos poços do Guarani na BP III

4.3.4.2 Perfil hidrogeológico

Ao comparar a cota potenciométrica do Aquífero Botucatu (poço MCR) com a cota potenciométrica do Aquífero Serra Geral, observa-se que a potenciométrica do Aquífero Botucatu está acima do nível potenciométrico do Aquífero Serra Geral nesta área. Para avaliar esta condição potenciométrica entre os aquíferos, na região de estudo, foi confeccionado um perfil topográfico entre os poços, desde MCR a Pato Bragado (Figura 98), a partir dos dados hidráulicos dos poços, foi confeccionado um perfil hidrogeológico (Figura 99).

Observa-se que a cota potenciométrica do Aquífero Botucatu (poço em MCR), está acima da cota altimétrica dos poços situados no município de Pato Bragado (PB e PB 1), evidenciando a possibilidade hidráulica de conectividade entre os aquíferos. Ressalta-se que em função da compartimentação estrutural do ASG trata-se de um nível potenciométrico “virtual”.

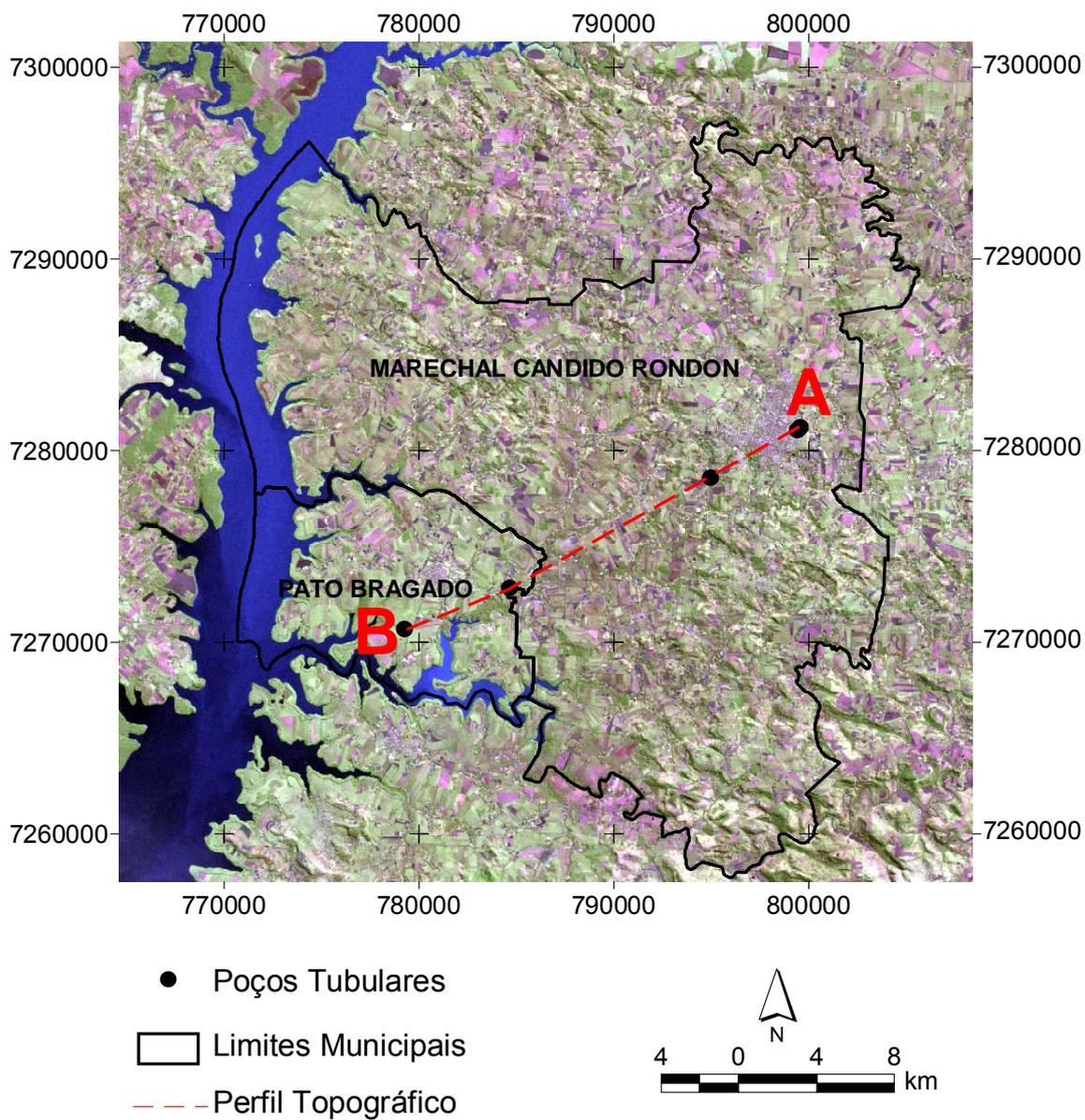
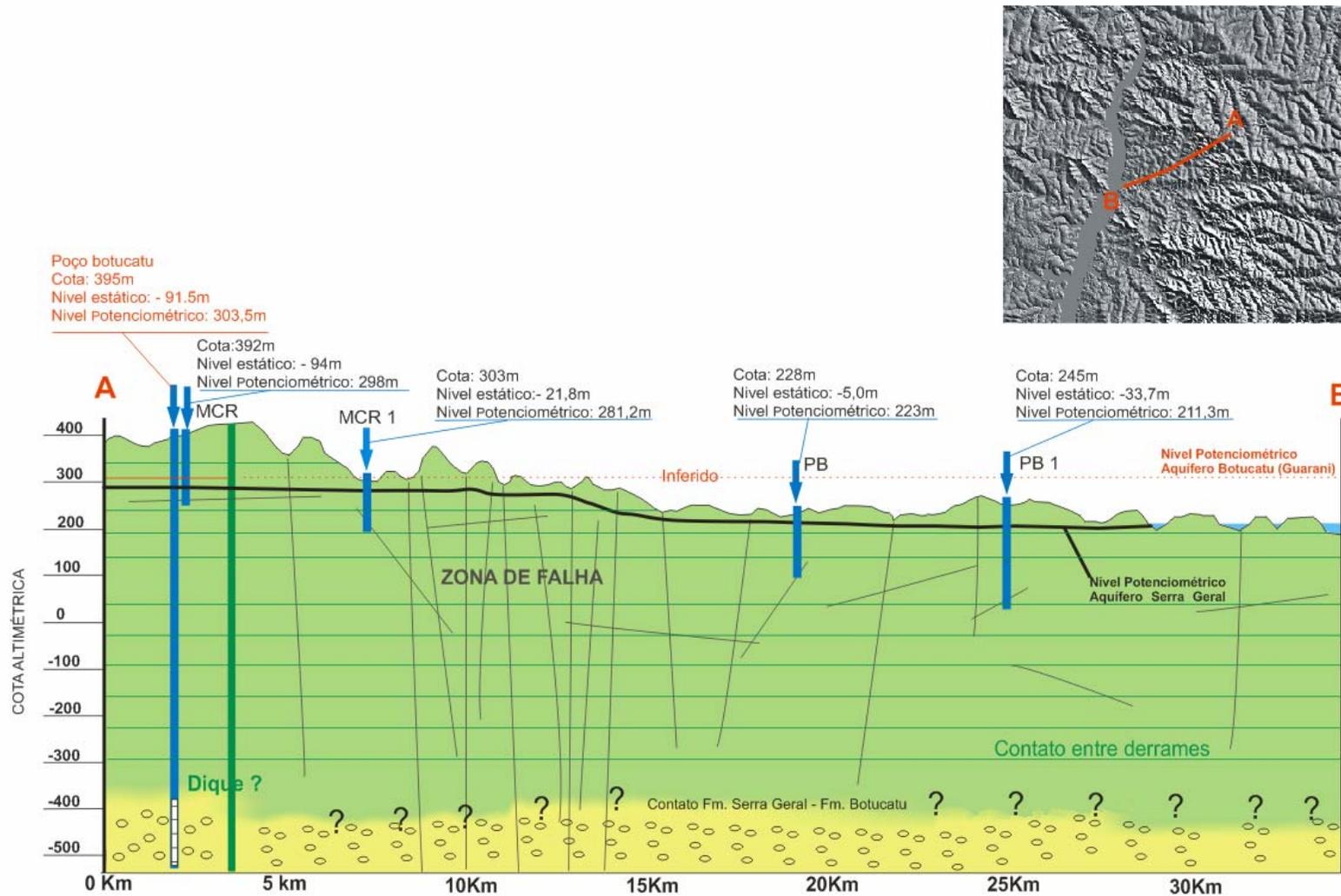


Figura 98 - Localização dos poços utilizados no perfil hidrogeológico.



Perfil hidrogeológico dos poços estudados

Figura 99 - Perfil topográfico e superfície potenciométrica “virtual” dos poços estudados

Observando as análises físico-químicas dos poços que captam o ASG, apresentadas no perfil selecionado, pode-se notar que a amostra MCR apresenta pouca semelhança química com o padrão “bicarbonatada cálcica” do ASG. Da mesma forma as amostras PB e PB-01 também possuem indicativos de mistura de águas entre os Aqüíferos Serra Geral e Guarani.

A relação potenciométrica entre os aqüíferos contribui para explicar os teores “anômalos” ao ASG, principalmente para os íons sulfato e sódio.

Conforme ilustrado na Figura 100 os poços utilizados no perfil hidrogeológico podem ter seus teores diferenciados do padrão hidroquímico bicarbonatada cálcica em função da mistura de águas entre os aqüíferos Serra Geral e Botucatu. Entretanto, sabe-se que a Fm. Serra Geral possui litotipos alcalinos que também poderiam influenciar nesta variação da tipologia química

A hipótese de mistura de águas entre os ASG e Botucatu, neste caso, parece mais apropriada, em função das tipologias químicas entre os dois aqüíferos. Corroborar esta decisão a possibilidade de amostragem do Aqüífero Botucatu para classificação química das águas e obtenção dos dados hidrodinâmicos

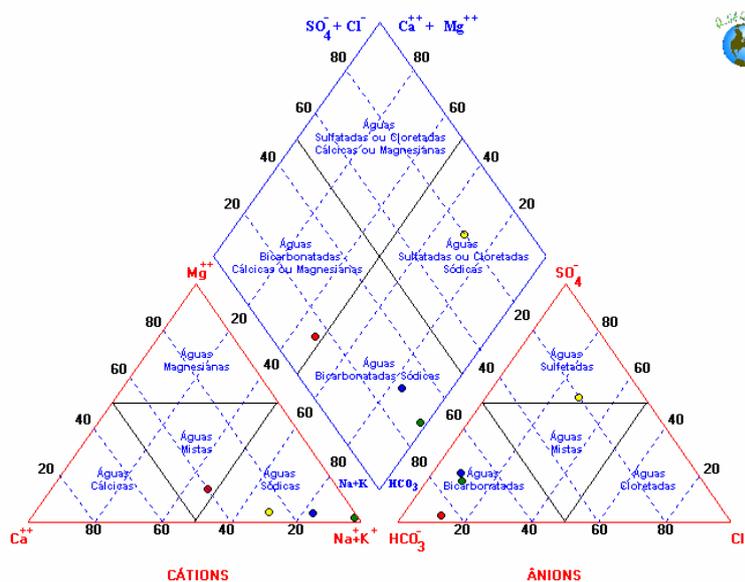


Figura 100 - Diagrama de Piper com os poços utilizados nesta análise (Vermelho: MCR 1, Azul: PB, Verde: PB 1 e Amarelo: MCR)

5. CONCLUSÕES

O arcabouço tectônico da Fm. Serra Geral, na área de estudo, é composto principalmente por estruturas rúpteis, que representam o registro de várias fases deformacionais, superpostas e recorrentes.

A influência das estruturas rúpteis (lineamentos) nas vazões do ASG não pode ser negligenciada na etapa de locação dos poços tubulares. Neste aspecto esta dissertação pôde caracterizar o ASG quanto à densidade, frequência e comprimento acumulado dos lineamentos, em três diferentes tipos de escala.

A aparente relação entre densidade de lineamentos e poços com vazões maiores que 45 m³/h não pode ser explicada utilizando apenas os estudos realizados. Tal fato deve-se principalmente a heterogeneidade estrutural do reservatório e/ou à maior permeabilidade de fraturas horizontais, bem como contatos entre derrames, pouco identificáveis sob a forma de lineamentos em superfície.

Estudos com imagens de alta resolução e controle detalhado das estruturas em campo podem minimizar o risco exploratório, uma vez que possibilitam, em escala macroscópica, identificar zonas de falha extensionais ou outras estruturas não tectônicas favoráveis a circulação e armazenamento de água.

Foram classificados sete tipos principais de água no ASG, na área deste estudo: bicarbonatada cálcica (43,6%); bicarbonatada sódica (17,9%); bicarbonatada sódica-cálcica (12,8%); bicarbonatada cálcica-sódica (7,7%); bicarbonatada-carbonatada sódica (7,7%); carbonatada sódica (5,1%); sulfatada-bicarbonatada sódica (5,1%).

Alguns parâmetros destacam-se por diferenciarem do padrão existente no aquífero serra geral, estas “anomalias físico-químicas” em função da semelhança com o tipo químico das águas do aquífero Botucatu (em sua área de confinamento), e também pela relação potenciométrica local (que indica ascensão do fluxo em direção ao ASG), sugere que ocorra mistura de águas entre o ASG e o aquífero Botucatu, na área de MCR.

Ressalta-se que o fluxo entre aquíferos dá-se principalmente por falhas de alto de mergulho, este fato destaca a importância do mapeamento destas estruturas, bem como um detalhamento e controle das mesmas em campo.

Dentre as amostras coletadas, as águas do ASG não apresentam restrições para consumo humano ou irrigação. Para consumo humano, excetuam-se dois poços, um situado em MCR e outro em Pato Bragado, que apresentam valores de fluoreto e pH (respectivamente) acima dos valores da portaria 518 do ministério da Saúde.

Frente ao elevado tempo de residência destas das águas do Aquífero Botucatu na área da BPIII, quando ocorrem condições favoráveis à comunicação entre os aquíferos, muitas vezes as águas do ASG acabam por perder qualidade, tanto para consumo quanto para irrigação, em função do aumento na concentração dos teores.

O ASG deve ser encarado como importante recurso hídrico, em especial na região da BPIII em função de sua qualidade e aptidão para o consumo *in natura*, bem como pela possibilidade de suprir a demanda de irrigação em períodos prolongados de estiagem.

6. REFERENCIAS

BITTENCOURT, A.V.L.; ROSA FILHO, E.F.; HINDI, E.C.; BUCHMANN FILHO, A.C. A influencia dos basaltos e de misturas com águas de aquíferos sotopostos nas águas subterrâneas do sistema aquífero Serra Geral, na bacia do rio Piquiri, Paraná, BR. **Águas Subterrâneas**. Curitiba: ABAS, v. 17, p. 67-75, 2003.

BRASIL. 2004. Ministério da Saúde. Portaria nº 518 de 25 de março de 2004. Estabelece normas e o padrão de potabilidade da água destinada ao consumo humano. **Diário Oficial da União**, Brasília, v. 59, p. 266-270, 26 mar. 2004, Seção 1.

BUCHMANN FILHO, A.C. **Características das águas subterrâneas do Sistema Aquífero Serra Geral no estado do Paraná**. Curitiba, 2002, 120p. Dissertação (Mestrado em Geologia Ambiental) Departamento de Geologia, UFPR.

CARVALHO, S. M; STIPP N. A. F. Contribuição ao estudo do balanço hídrico no estado do paraná: uma Proposta de classifica o qualitativa. **Geografia**. Londrina, V 13, n 1. JAN./JUN. 2004.

CETESB. 2006. **Variáveis de qualidade das  guas**. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/Agua/rios/variaveis.asp>> Acesso 10/10/2006.

CPRM. 2000. **Hidrogeologia conceitos e aplica es**. Serviço Geológico do Brasil. 2^a ed.

CPRM. 2006. Forma o Serra Geral. Disponível em http://www.cprm.gov.br/Aparados/ap_geol_pag05.htm. Acesso em 02/10/2006.

CPTEC- Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos. Disponível em: <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/>> Acesso em 29/12/2007.

CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M. R. 1983a. **Hidrologia Subterrânea**. Barcelona: Omega.

CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M. R. 2001. **Hidrologia Subterrânea**. 2ª edição. Barcelona: Omega.

FERNANDES, A. J.; , C.; WAHNFRIED, I.; FERREIRA, L. M. R.; PRESSINOTTI, M. M. N.; VARNIER, C.; IRITANI, M. A.; HIRATA, R. Modelo conceitual preliminar de circulação de água subterrânea do aquífero Serra Geral, Ribeirão Preto, SP. **In:** XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas da ABAS., 2006. Anais do XIV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2006.

FETTER, C. W. 1994. **Applied Hydrogeology**. Upper Saddle River: Prentice-Hall.

FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. 1979. **Groundwater**. Englewood: Prentice-Hall.

FREITAS, R.C.; ROSTIROLLA, S.P.; MANCINI, F. Auxílio computacional na análise de lineamentos obtidos por sensores remotos. **In:** CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 42, 2004, Araxá. **Anais...** Araxá: SBG, 2004, CD-ROM.

FREITAS, R. C. **Análise Estrutural Multi-Temática Do Sistema Petrolífero Irati-Rio Bonito/Pirambóia**. 2005. 0 F. Dissertação (Mestrado Em Pós Graduação Em Geologia) - Departamento De Geologia, Fundação Da Ufpr Para O Desenvolvimento Da Ciência Tecnologia E Cultura

HEM, J. D. 1985. *Study and Interpretation of the chemical characteristics of natural waters*. **Geological Survey Water- Suply Paper**. n. 2254, p1- 263.

HEM, J. D. 1970. *Study and Interpretation of the chemical characteristics of natural waters*. **Geological Survey Water- Suply Paper**. n. 1473, p1- 334.

HINDI, E. C. 1999. **Caracterização hidroquímica e hidrogeológica das fontes cársticas das Bacias dos rios Tumiri, Água Comprida, Fervida e das Onças – Colombo, PR**. Curitiba, 127 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

HINDI, E.C.; **Hidroquímica e hidrotermalismo do Sistema Aquífero Guarani no Estado do Paraná**. Curitiba, 2007, 153p. Tese (Doutorado em Geologia Ambiental) Departamento de Geologia, UFPR.

HOBBS, W. *Lineaments of the Atlantic border region*. **GSA Bulletin**, v. 15, p. 483 - 506, 1904.

IAPAR. 2000. Instituto Agrônomo do Paraná. **Cartas Climáticas do Paraná**. Disponível em <<http://www.iapar.br>> Acesso em 04 nov. 2008.

IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2006. Disponível em <<http://www.ibge.com.br>> Acesso em 17 nov. 2006.

KRAUSKOPF, K. L. 1972. **Introdução à geoquímica**. São Paulo: Edusp-Polígono.

LICHT, O. A. B. 2001. **Análise multielementar na gestão ambiental – Identificação e caracterização de Províncias Geoquímicas naturais, alterações antrópica da paisagem, áreas favoráveis à prospecção mineral e regiões de risco para a saúde no Estado do Paraná, Brasil**. Curitiba, V1-V2. 209 f. Tese (Doutorado em Geologia) - Setor de Ciências da terra, Universidade Federal do Paraná.

MELFI, A. J.; PICCIRILLO, E. M. ; NARDY, A. J. R. *Geological and magmatic aspects of the Parana Basin: an introduction*. In: PICCIRILLO E. M. & MELFI, A. J. (Eds.). *The Mesozoic Flood Volcanism of the Parana Basin: petrogenetic and geophysical aspects*. São Paulo: USP, 1988. p. 1-14.

MILANI, J.; FRANÇA, A.B.; SCHNEIDER, R.L. Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v.8, n.1, p.69-82. 1994.

MINEROPAR – Minerais do Paraná S.A. Mapa geológico do Estado do Paraná. Escala 1:650.000 Curitiba: Mineropar, 2001.

O'LEARY, D. W.; FRIEDMAN, J.D; POHN, H. A. *Lineament, linear lineation some proposed new standards for old terms. Geological Society America Bulletin* 87, p. 1463-1469,1976.

PARANÁ. Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Banco de dados georreferenciados de poços tubulares profundos. Curitiba, 2006.

PEATE D. W.; HAWKESWORTH C. J.; MANTOVANI M. S. M. 1992. Chemical Stratigraphy of Paraná Lavas (South America): Classification of Magma Types and their Spatial Distribution. **Bull. Volcanol**, 55: 119-139.

PIPER, A.M. *A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. Transactions of the American Geophysical Union – 1944. Washington (DC), Part VI, p. 914-928, May/1945.*

ROHRBAUGHT Jr., M. B.; DUNNE, W. M.; MAULDON, M.; **Estimating fracture trace intensity, density, and mean length using circular scan lines and windows.** In: AAPG Bulletin, v. 86, n. 12, December, 2002, p. 2089 – 2104.

ROSA FILHO, E.F.; BITTENCOURT, A.V.L.; SALAMUNI, R. Contribuição ao estudo das águas subterrâneas nos basaltos no Estado do Paraná. **Boletim Paranaense de Geociências**, n.37, p. 22-41, 1987.

ROSA FILHO, E. F.; HINDI, E. C. 2006. Diagnóstico das águas subterrâneas no Estado do Paraná: quantidade e Qualidade. **Relatório técnico.**

ROSTIROLLA, S. P. Comentários sobre a evolução tectônica da Placa Sul-Americana no Fanerozóico, com ênfase na análise da Bacia do Paraná e áreas correlatas na Argentina. In: IV SEGEPAR, 2005, Curitiba, PR. **Anais.** Curitiba, PR : CEGEP, 2005. v. 1.

ROSTIROLLA, S.P.; MANCINI, F.; RIGOTI, A. Reativação de Megalineamentos na Evolução Fanerozóica da Placa Sul-Americana. In: X SNET, Curitiba, Resumo expandido submetido e aceito, 2005.

RÜEGG, N. A. **Aspectos geoquímicos, mineralógicos e petrográficos de rochas basálticas da Bacia do Paraná**, São Paulo, 1969. Tese (Doutorado), USP.

SDSU – *San Diego University, Department of Geological sciences*. In: <http://www.geology.sdsu.edu/> ; (2006).

SOARES P.C., BARCELLOS P.E., CSORDAS S.M. 1982. Análise, interpretação e integração de lineamentos a partir de imagens (Radar-Landsat) e suas relações com a tectônica da Bacia do Paraná. São Paulo: **Relatório RT-342/82, Paulipetro**. Consórcio CESP.

STRUGALE, M.; **Arcabouço e evolução estrutural do Arco de Ponta Grossa no Grupo São Bento (Mesozóico): implicações na hidrodinâmica do sistema Aquífero Guarani e na migração de hidrocarbonetos na Bacia do Paraná**. Curitiba, 2002, 138p. Dissertação (Mestrado em Geologia Exploratória), Departamento de Geologia, UFPR.

THORNTWAITE, C. W., MATHER, J. R. 1995. The water balance. **Climatology** 8:1-104.

TOOD, D. K. 1959. **Hidrologia de águas subterrâneas**. São Paulo: Edgar Blücher.

USGS; EROS Data Center; *Data Services Branch. Seamless Data Distribution System*. Disponível em: <<http://seamless.usgs.gov/>> Acesso em: 12 nov. 2005

U.S. SALINITY STAFF. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. U. S. *Department of agriculture; Agriculture Handbook*, n. 60, 160p. Washington, DC, 1954.

WHITE, I.C. (1906) **Relatório Final da Comissão de Estudos das Minas de Carvão de Pedra do Brasil**. Rio de Janeiro: DNPM, 1988. Parte I; Parte II, p. 301-617. (ed. Fac-similar)

World Stress Map. 2006. Disponível em: <http://www-wsm.physik.unikasruhe.de/pub/introduction_frame.html> Acesso 02/10/2006.

ZALÁN, P. V., WOLFF, S., CONCEIÇÃO, J. C., MARQUES, A., ASTOLFI, M. A. M., VIEIRA, I. S., APPI, V. T. Bacia do Paraná. **In: Origem e Evolução de Bacias Sedimentares**. Rio de Janeiro: PETROBRAS, 1990b. p. 135 - 164.

UTM_X	UTM_Y	TEMPERATURA	pH	TURBIDEZ	ALCALINIDADE	BICARBONATO	CARBONATO	CLORETO	DUREZA	CÁLCIO	MAGNÉSIO	FERRO	FLUORETO	CO2	NITRATO	STD	SULFATO	CONDUTIVIDADE	SILICA	SÓDIO	POTÁSSIO
772189	7288922	23	8,02	1,94	96,90	88,74	8,16	32,00	78,00	22,84	5,10	0,01	0,27	1,85	0,44	82,00	85,00	173,30	40,10	75,00	0,65
795147	7278959	24	7,93	0,22	95,56	95,56	0,00	7,00	63,00	19,24	3,64	0,00	1,08	2,24	4,43	76,00	1,00	160,90	33,18	26,00	0,41
794985	7278605	23	7,62	0,32	95,68	95,68	0,00	7,00	75,00	22,80	4,37	0,01	0,08	4,59	6,64	66,00	1,00	139,90	38,22	22,00	0,35
799873	7278840	23	8,74	0,28	100,88	78,00	22,88	5,00	12,00	3,60	0,72	0,01	0,12	0,00	5,31	62,00	1,00	132,30	30,32	46,00	0,18
799412	7281082	25	6,86	0,50	48,99	59,77	0,00	4,15	36,61	12,05	1,60	0,04	0,12	10,50	6,63	125,00	14,69	161,70	33,50	15,30	1,10
799409	7281083	23	8,05	0,57	58,24	58,24	0,00	49,00	78,00	28,45	1,70	0,01	0,25	1,03	2,21	164,00	125,00	34,80	25,20	90,00	0,18
799578	7283974	23	8,33	0,27	62,40	45,76	16,64	4,00	26,00	9,61	0,48	0,01	0,02	0,00	7,08	40,00	0,00	84,30	27,90	20,00	0,44
799828	7284209	23	8,93	0,25	74,88	62,40	12,48	4,00	20,00	6,41	0,97	0,01	0,09	0,00	1,77	46,00	1,00	97,90	24,32	28,00	0,33
797593	7284050	23	7,42	0,26	91,52	91,52	0,00	5,00	64,00	18,00	4,62	0,01	0,07	6,95	4,87	50,00	1,00	105,30	34,15	17,00	0,50
797662	7282497	25	6,93	0,42	69,68	69,68	0,00	9,00	58,00	14,80	5,10	0,03	0,09	16,37	10,18	45,00	1,00	97,10	32,22	13,80	0,56
794985	7278605	24	7,85	0,34	107,12	107,02	0,00	7,00	78,00	24,80	3,89	0,01	0,04	3,02	7,08	56,00	1,00	119,40	37,92	20,00	0,33
795147	7278959	24	8,00	0,24	96,72	96,72	0,00	6,00	56,00	19,20	3,89	0,01	0,04	0,96	3,54	55,00	1,00	116,90	32,17	22,00	0,34
796643	7284653	22	7,20	0,32	92,56	92,56	0,00	4,00	80,00	22,04	6,08	0,00	0,16	11,68	5,75	45,00	1,00	95,50	39,80	7,70	0,76
794199	7283158	24	8,37	0,38	53,04	46,80	6,24	5,40	44,00	14,08	2,19	0,01	0,07	0,00	2,66	32,00	1,00	67,70	29,97	8,90	0,53
772533	7289106	23	7,20	0,44	57,20	57,20	0,00	9,70	60,00	17,23	4,15	0,00	0,23	7,21	11,51	37,00	1,00	77,50	38,42	7,30	0,55
776740	7282696	23	7,03	0,44	57,20	57,20	0,00	6,90	48,00	13,63	3,40	0,01	0,13	10,67	7,97	32,00	1,00	67,90	36,72	6,70	0,53
777175	7283599	23	7,62	0,34	84,24	84,24	0,00	8,30	66,00	18,84	4,62	0,01	0,15	4,04	3,10	39,00	1,00	82,60	43,45	11,90	0,44
781174	7281087	23	7,96	0,42	113,36	113,36	0,00	12,10	89,00	28,05	4,62	0,02	0,17	2,48	8,85	63,00	21,00	145,60	37,27	30,00	0,47
780917	7285507	24	8,67	0,41	125,84	105,04	20,80	6,90	27,00	6,41	2,67	0,01	0,24	0,00	2,66	67,00	0,00	140,60	23,73	53,50	0,25
779128	7300104	24	8,02	0,53	133,12	133,12	0,00	3,90	74,00	18,03	7,05	0,02	0,22	2,54	2,66	62,00	0,00	130,10	30,75	28,00	0,30
778259	7294675	24	7,65	0,40	88,40	88,40	0,00	3,70	81,00	24,85	4,62	0,00	0,24	3,95	6,64	44,00	1,00	93,90	33,55	7,20	0,39
791326	7286280	23	7,75	0,39	57,20	57,20	0,00	5,30	40,00	13,62	1,45	0,01	0,10	2,03	10,18	36,00	0,00	76,10	28,07	12,30	0,43
791156	7270698	23	7,34	0,41	59,28	59,28	0,00	4,80	53,00	14,02	4,37	0,01	0,16	5,41	5,31	33,00	1,00	69,10	30,95	5,70	0,65
796362	7265257	23	7,35	0,84	110,24	110,24	0,00	8,20	91,00	31,26	3,16	0,05	0,13	9,84	7,08	55,00	1,00	118,50	24,62	15,80	0,41
803650	7288650	23	8,52	0,35	46,80	32,24	14,56	5,00	24,00	8,41	0,72	0,01	0,15	0,00	2,66	32,00	0,00	68,40	30,53	15,30	0,26
778259	7294675	25	7,72	0,61	89,28	89,28	0,00	7,00	73,30	22,53	4,88	0,09	0,08	3,40	5,75	38,00	1,00	82,30	32,95	11,90	0,52
779128	7300104	26	7,90	0,61	123,84	123,84	0,00	9,00	67,27	13,68	8,06	0,04	0,26	3,11	3,98	59,00	1,00	124,90	38,00	38,50	0,30
801799	7279079	24	9,21	0,28	101,20	60,72	40,48	8,00	6,00	2,00	0,24	0,01	0,00	0,00	3,98	79,00	1,00	166,90	25,40	57,00	0,15
794991	7278595	23	7,65	0,50	107,55	131,21	0,00	0,60	79,27	26,24	3,38	0,02	0,09	7,04	5,04	176,00	0,50	228,00	45,90	15,60	0,50
791937	7278596	25	7,10	0,50	108,07	131,85	0,00	2,25	113,00	33,72	7,20	0,04	0,06	7,90	15,91	206,00	0,50	279,00	56,10	10,80	0,80
784640	7272801	24	9,29	0,50	102,41	84,03	20,12	8,33	23,69	8,05	0,90	0,01	0,29	0,00	1,50	226,00	26,79	344,00	46,30	62,80	0,60
762041	7219787	23	6,45	2,10	28,68	34,99	0,00	0,55	24,08	6,52	1,94	0,30	0,02	1,80	0,31	67,00	0,50	59,50	33,80	1,90	0,70
779269	7270694	25	10,05	0,50	180,18	49,53	83,75	18,08	2,53	0,82	0,12	0,02	0,70	0,00	0,09	331,00	37,10	528,00	37,10	123,00	0,60
780524	7266080	27	9,62	0,50	111,50	86,99	24,12	1,38	3,80	1,44	0,05	0,29	0,14	0,00	3,14	174,00	0,50	267,00	39,10	52,20	0,70
781067	7261496	27	8,81	0,50	100,90	106,09	8,36	0,83	15,01	8,84	0,73	0,03	0,21	0,00	1,06	176,00	0,50	208,00	52,60	43,20	0,50
745655	7170193	23	7,06	0,50	74,29	90,63	0,00	2,65	66,37	18,53	4,93	0,04	0,13	9,70	4,64	136,00	0,50	1479,00	44,20	7,20	1,30
772293	7214720		7,63	3,00	90,82	110,80	0,00	1,15	86,01	22,94	7,05	0,52	0,11	8,80	7,74	161,00	0,50	200,00	47,50	7,80	0,70
743122	7173714	24	8,41	0,50	78,38	90,69	2,42	3,63	40,95	12,07	2,69	0,02	1,64	0,00	2,56	141,00	0,50	195,10	33,30	26,80	1,30