



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS / FACULDADE DE GEOLOGIA
III CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM GESTÃO HÍDRICA E AMBIENTAL

GERSON FLÔRES NASCIMENTO

GEOESTATÍSTICA APLICADA NO DIAGNÓSTICO
DA QUALIDADE DE ÁGUAS SUBTERRRÂNEAS

Belém

2014

GERSON FLÔRES NASCIMENTO

GEOESTATÍSTICA APLICADA AO DIAGNÓSTICO
DA QUALIDADE DE ÁGUAS SUBTERRRÂNEAS

Monografia apresentada como requisito parcial para obtenção do certificado de Especialista em Gestão Hídrica e Ambiental pela Faculdade de Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará – Campus do Guamá.

Orientador: Prof^o. Dr. Francisco de Assis Matos de Abreu

BELÉM

2014

FICHA CATALOGRÁFICA

Dados de Publicação Internacional na Publicação (CIP)

N244g

Nascimento, Gerson Flôres

Geoestatística aplicada no diagnóstico da qualidade de águas subterrâneas. / Gerson Flôres Nascimento. Belém-Pa, 2014.
70f. ; + 1 CD-ROM : il.

Orientador : Profº. Dr. Francisco de Assis Matos de Abreu

Monografia (Especialização em Gestão Hídrica e Ambiental) Faculdade de Geologia - Instituto de Geociências - Universidade Federal do Pará , Belém, 2014.

1. Água subterrânea. 2. Índice de Qualidade de Água. 3. Krigagem Ordinária. I. Universidade Federal do Pará. II. Título.

CDU: 556.3

CDD: 551.49

Bibliotecária Responsável: Fabiany M. de Andrade, CRB11/686

GERSON FLÔRES NASCIMENTO

GEOESTATÍSTICA APLICADA NO DIAGNÓSTICO
DA QUALIDADE DE ÁGUAS SUBTERRRÂNEAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Especialização *Lato Sensu* do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial à obtenção de grau de Especialista em Pós lato sensu em Gestão Hídrica e Ambiental.

Data da aprovação: 29 / 01 / 2014.

Conceito:

Banca Examinadora:

Profº. Francisco de Assis Matos de Abreu - Orientador
Doutor em Geologia Regional e Geodinâmica
Universidade Federal do Pará

Profº.Milton Antonio da Silva Matta
Doutor em Geologia
Universidade Federal do Pará

Profº.Arinaldo Queiroz da Silva
Doutor em Sensoriamento Remoto
Universidade Federal do Pará

Este trabalho é dedicado ao meu primo
DANIEL CASARA DE CASTRO (*in memoriam*)

AGRADECIMENTOS

Ao meu nobre orientador, Prof^o. Dr. FRANCISCO DE ASSIS MATOS DE ABREU, da Faculdade de Geologia – Instituto de Geociências da UFPA, pela confiança e apoio que me foram concedidos durante a orientação deste trabalho e pelo aprendizado proporcionado.

Ao Geólogo Ms. MARCOS NÓBREGA II, da CPRM – Serviço Geológico do Brasil - Residência de Porto Velho, pela dedicação ininterrupta na formação da base de dados para fundamentar este trabalho.

Ao Eng^o. Ms. FRANCISCO DE ASSIS DOS REIS BARBOSA, Assistente de Hidrologia e Gestão Territorial da CPRM – Serviço Geológico do Brasil - Residência de Porto Velho, pelo apoio logístico.

Ao Prof^o. Ms. JOSÉ FERNANDO PINA ASSIS, tutor do Curso de Especialização em Gestão Hídrica e Ambiental da UFPA na modalidade à distância, pelas suas marcantes e necessárias motivações durante a realização deste curso.

Ao Prof^o. Dr. MILTON ANTONIO DA SILVA MATTA, pelas relevantes contribuições como professor e como membro da banca examinadora.

Ao Prof^o. Dr. ARNALDO QUEIROZ DA SILVA, pelas importantes contribuições pontuais, como membro da banca examinadora.

À LAIS CORREA TORRES, Secretária do Curso de Especialização em Gestão Hídrica e Ambiental da UFPA, pela eficácia e eficiência no atendimento que recebi durante o curso.

À minha esposa JOZEANE MOREIRA FLÔRES, pela compreensão de minha ausência em momentos importantes e pelo apoio incondicional.

À equipe do curso de Curso de Especialização em Gestão Hídrica e Ambiental da UFPA na modalidade à distância, pela competência no ensino a distância e pesquisa.

À CPRM – Serviço Geológico do Brasil, na pessoa da Chefe da Residência de Porto Velho, Ms. HELENA DA COSTA BEZERRA, pela realização das atividades de campo e análise laboratorial.

À UNIR - Universidade Federal de Rondônia, na pessoa da Magnífica Reitora Prof^a. Dr^a. MARIA BERENICE ALHO DA COSTA TOURINHO, pela concessão incondicional do tempo necessário para realização de estudos e deslocamentos.

RESUMO

Gerson Flôres Nascimento. Geoestatística aplicada no diagnóstico da qualidade de águas subterrâneas. Belém - PA, 2013 [Monografia – Faculdade de Geologia - Instituto de Geociências - Universidade Federal do Pará]

Este trabalho foi realizado no perímetro urbano de Porto Velho – RO e envolveu três unidades estratigráficas: Formação Jaciparaná, Lateritos Imaturos e Complexo Jamari; cujo principal objetivo foi a elaboração de um diagnóstico da qualidade das águas subterrâneas. Para este estudo foram coletadas 141 amostras de água de poço, no período de alta pluviosidade, de janeiro a março de 2012, sobre as quais foram obtidos os resultados de análises laboratoriais sobre os teores dos parâmetros coliformes termotolerantes, ferro, manganês, cloreto, dureza, fluoreto, pH, sulfato, turbidez, nitrato, e amônia. As informações sobre os teores dos parâmetros estudados foram armazenadas em planilhas eletrônicas onde receberam crítica e validação. A partir de relações matemáticas foram calculados os valores do IQAS - índice de qualidade de água subterrânea, que receberam quatro classificações: excelente, bom, médio e ruim; além disso, em função dos valores dos IQAS, os dados foram divididos em dois grupos: grupo A formado pelos parâmetros com IQAS de classificação excelente ou bom e, grupo B formado pelos parâmetros com IQAS de classificação médio ou ruim. Após os cálculos para ajuste dos semivariogramas com auxílios dos softwares GS⁺ versão 9 e Surfer versão 8, foram confeccionados mapas de valores estimados por krigagem ordinária para os teores de cada parâmetro dentro de cada grupo; também foi confeccionado um mapa para valores estimados de IQAS por krigagem ordinária. Com os resultados desta pesquisa foi possível identificar os bairros do perímetro urbano de Porto Velho com maior ou menor índice de qualidade de água subterrânea, além disso, também foi possível identificar a variação do IQAS por unidade estratigráfica.

Palavras-chave: Água subterrânea, Índice de Qualidade de Água, Krigagem Ordinária.

ABSTRACT

Gerson Flôres Nascimento. Geostatistics applied to groundwater quality assessment. Belém, 2013
[Monograph – Faculty of Geology - Institute of Geosciences – Federal University of Pará]

This research was conducted in the urban area of Porto Velho (Brazilian state of Rondônia) and involved three stratigraphic units: the Jaciparaná Formation, immature laterite and the Jamari Complex. The main objective was to assess the quality of groundwater. For this purpose, 141 samples of well water were collected during the rainy season, from January to March 2012. Those samples underwent laboratory tests for the following parameters: thermotolerant coliforms, iron, manganese, chloride, hardness, fluoride, pH, sulfate, turbidity, nitrate, and ammonia. The results were organized in spreadsheets where they were criticized and validated. The groundwater quality index values were calculated based on mathematical relations, and received four ratings: excellent, good, average and bad. The data were separated in two groups: group A, formed by the values rated "excellent" and "good", and group B, formed by those rated "average" and "bad". After adjusting the semivariogram (with the aid of softwares GS⁺, version 9, and Surfer, version 8), a set of maps was elaborated with values estimated by ordinary kriging for the levels of each parameter within each group, as well as a map with values for the groundwater quality index estimated by ordinary kriging. The results of the study allowed to identify the regions in the urban area of Porto Velho with higher and lower rates of groundwater quality. It was also possible to identify the variation of the groundwater quality index according to the stratigraphic units.

Keywords: Groundwater, Water Quality Index, Ordinary Kriging.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. BAIRROS SOBRE A MANCHA URBANA DE PORTO VELHO	4
FIGURA 2. MAPA GEOLÓGICO DA ÁREA DE ESTUDO	12
FIGURA 3. SEMIVARIOGRAMA ESQUEMÁTICO	30
FIGURA 4. ÁREA DE COLETA DAS AMOSTRAS	42
FIGURA 5. MAPAS DE KRIGAGEM ORDINÁRIA PARA VALORES DE FERRO	55
FIGURA 6. MAPAS DE KRIGAGEM ORDINÁRIA PARA VALORES DE CLORETO	55
FIGURA 7. MAPAS DE KRIGAGEM ORDINÁRIA PARA VALORES DE DUREZA	56
FIGURA 8. MAPAS DE KRIGAGEM ORDINÁRIA PARA VALORES DE FLUORETO	56
FIGURA 9. MAPAS DE KRIGAGEM ORDINÁRIA PARA VALORES DE PH.....	57
FIGURA 10. MAPAS DE KRIGAGEM ORDINÁRIA PARA VALORES DE SULFATO	57
FIGURA 11. MAPAS DE KRIGAGEM ORDINÁRIA PARA VALORES DE TURBIDEZ	58
FIGURA 12. MAPAS DE KRIGAGEM ORDINÁRIA PARA VALORES DE NITRATO	58
FIGURA 13. SEMIVARIOGRAMA PARA IQAS.....	59
FIGURA 14. MAPA DE VALORES DE IQAS ESTIMADOS POR KRIGAGEM ORDINÁRIA	60

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1. COLETA E PRESERVAÇÃO DE AMOSTRAS PARA ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA	38
QUADRO 2. MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS	39

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. CLASSES DE IQAS DOS PARÂMETROS ESTUDADOS POR POÇO	43
TABELA 2. DISTRIBUIÇÃO DA QUANTIDADE DE POÇOS AMOSTRADOS POR UNIDADE ESTRATIGRÁFICA	48
TABELA 3. QUANTIDADE DE POÇOS COM PARÂMETROS FORA DO VMP	49
TABELA 4. QUANTIDADE DE POÇOS COM A CLASSIFICAÇÃO DO IQAS	50
TABELA 5. PARÂMETROS VARIOGRÁFICOS DAS VARIÁVEIS NOS GRUPOS A E B	51

LISTA DE EQUAÇÕES

EQUAÇÃO 1. ÍNDICE DE QUALIDADE DE ÁGUA SUBTERRÂNEA - IQUAS	15
EQUAÇÃO 2. ÍNDICE DE QUALIDADE DE ÁGUA SUBTERRÂNEA - IQAS	16
EQUAÇÃO 3. ÍNDICE DE MICROORGANISMOS = I_{Bio}	16
EQUAÇÃO 4. ÍNDICE DE FERRO E MANGANÊS = I_{FeMn}	16
EQUAÇÃO 5. ÍNDICE DE MINERAÇÃO E SALINIDADE = I_{MS}	17
EQUAÇÃO 6. ÍNDICE DE PARTÍCULAS EM SUSPENSÃO = I_{PS}	17
EQUAÇÃO 7. ÍNDICE DE NITRATO = I_{NIT}	17
EQUAÇÃO 8. ÍNDICE DE NITROGENADOS (FORA NITRATO) = I_{AMO}	18
EQUAÇÃO 9. SEMIVARIOGRAMA	28
EQUAÇÃO 10. ESTIMATIVA DO SEMIVARIOGRAMA	29
EQUAÇÃO 11. MODELO ESFÉRICO	30
EQUAÇÃO 12. MODELO EXPONENCIAL	30
EQUAÇÃO 13. MODELO GAUSSIANO	31
EQUAÇÃO 14. MODELO POTENCIAL	31
EQUAÇÃO 15. ESTIMATIVA DE UM PONTO POR KRIGAGEM	32
EQUAÇÃO 16. SISTEMA PARA A ESTIMATIVA DE UM PONTO	33
EQUAÇÃO 17. COMBINAÇÃO LINEAR	33
EQUAÇÃO 18. VARIÂNCIA ASSOCIADA A UM VALOR ESTIMADO	34

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Área de trabalho	3
1.2. Contexto geológico regional.....	5
1.2.1. Formação Jaciparaná	6
1.2.2. Lateritos imaturos	8
1.2.3. Complexo Jamari.....	10
2. REVISÃO DE CONCEITOS E TERMINOLOGIAS	13
2.1. Pesquisa em hidrogeologia	14
2.2. Qualidade das águas subterrâneas	14
2.3. Seleção de parâmetros e tamanho amostral	18
2.3.1. Coliformes termotolerantes.	19
2.3.2. Ferro e manganês.....	19
2.3.4. Cloreto	20
2.4.5. Dureza	21
2.3.6. Fluoreto	22
2.3.7. Potencial hidrogeniônico – pH	22
2.3.8. Sulfatos.....	24
2.3.9. Turbidez.....	25
2.3.10. Nitrato e amônia	26
2.4. Geoestatística: A técnica e algumas aplicações	28
2.4.1. Estudos anteriores.....	34
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	38

4. RESULTADOS	41
5. DISCUSSÃO.....	61
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	63
7. REFERÊNCIAS	65

1. INTRODUÇÃO

Questões associadas à inadequada conduta de uso e preservação de águas subterrâneas, há décadas, fazem parte de uma lista de problemas da cidade de Porto Velho, e este é um cenário fortemente associado a uma questão cultural, disseminado desde o início do povoamento. Uma das notáveis consequências desta conduta é o aumento do custo financeiro para captação, tratamento e transporte de água, além disso, pode-se fazer inclusão da redução do índice de qualidade de vida; pois não existe água em quantidade e qualidade suficiente para atendimento da demanda, cada vez mais reprimida.

Para resolver, ou tentar resolver, problemas sociais que são decorrentes de ações antropogênicas ou naturais, é extremamente importante a construção de uma base de conhecimento com relevância histórica e técnica do local, mas que esteja à disposição de gestores e da comunidade para elaboração e execução de projetos que visem a utilização racional de recursos naturais.

Assim, a ideia de contribuir na busca de soluções para problemas sociais decorrentes do modo de uso e preservação de águas subterrâneas, foi convertida no presente trabalho. O principal objetivo deste é a elaboração de um diagnóstico de águas subterrâneas na cidade de Porto Velho (RO) com aplicação de metodologia geoestatística, no sentido de identificar a distribuição espacial dos índices de qualidade de águas subterrâneas na área urbana. A coleta das amostras foi feita com tubo de Bailer e para as análises laboratoriais foram utilizados os métodos comumente utilizados no meio acadêmico. A organização e análise descritiva dos dados foram realizadas com planilhas eletrônicas da Microsoft Office Excel e, posteriormente, com aplicação dos softwares Surfer e GS⁺ para obtenção de informações que permitiram as análises conclusivas do trabalho.

A insistência em aplicar métodos quantitativos em situações associadas a demandas sociais, particularmente quando envolve variáveis ambientais, é motivo de estímulo para diversos pesquisadores. No contexto de aplicação de métodos quantitativos com variáveis ambientais em

Porto Velho e no Estado de Rondônia já existem diversos trabalhos com aplicação de técnicas de estatística e geoestatística (NASCIMENTO, 2008; NASCIMENTO e LANDIM, 2009; NASCIMENTO et al., 2011a, 2011b; 2011c; WANDERLEY et al., 2007; ZUFFO et al., 2009; NÓBREGA II et al., 2011).

No contexto de recursos hídricos subterrâneos, o conhecimento técnico e científico de maior relevância ao encaminhamento de solução de problemas da cidade de Porto Velho, teve início com os trabalhos realizados pela CPRM – Serviço Geológico do Brasil a partir de 1970 e, posteriormente, com a Universidade Federal de Rondônia a partir de 1982. Atualmente existem outras instituições que também produzem trabalhos científicos no contexto de águas subterrâneas em Porto Velho, mas um dos fatores preponderantes que inibe o crescimento da produção e a disseminação de conhecimento nesta área é o pouco volume de recursos financeiro disponibilizados pelos órgãos principalmente políticos ligados a este setor. A consolidação de uma base de conhecimento em recursos hídricos confiáveis e de fácil acesso é vital para gestores que tenham interesse em melhorar a qualidade de vida dos munícipes de Porto Velho – RO.

A elaboração de um diagnóstico de águas subterrâneas leva em conta as variáveis de interesse para resolver ou identificar um problema. Porto Velho (RO) é uma cidade de pequeno/médio porte econômico e apresenta considerado déficit em saneamento, combinado com a cultura popular de utilização de águas de poços amazônicos, além disso, já existem registros da ação de algumas empresas que utilizam rios e córregos para deposição de dejetos. Este cenário motivou a elaboração dessa pesquisa voltada ao diagnóstico da qualidade de águas subterrânea, com a inclusão de um estudo da correlação espacial, além dos índices de qualidade de água subterrânea.

O exposto explica a necessidade de realização deste trabalho para estudar as águas subterrâneas, no perímetro urbano de Porto Velho - RO, com o objetivo de obter os índices de qualidade de águas subterrâneas; identificar a existência de correlação e a distribuição espacial das variáveis regionalizadas coliformes termotolerantes, ferro, manganês, cloreto, dureza, fluoreto, pH, sulfato, turbidez, nitrato, e amônia; com aplicação da metodologia geoestatística e identificar a distribuição espacial dos índices de qualidade de águas subterrâneas das variáveis regionalizadas em estudo.

1.1. Área de trabalho

O Estado de Rondônia faz divisa, ao norte, com o Estado do Amazonas, ao oeste, com Estado do Acre, ao leste com o Estado do Tocantins e ao sul com o Estado de Mato Grosso e pertence à Amazônia Legal. A capital do Estado de Rondônia, Porto Velho, alvo dos estudos está localizada na porção norte do Estado de Rondônia e se tem acesso pelas principais rodovias federais seja ao sul e oeste, ambos pela BR364, ou tendo acesso pelo norte do Estado utilizando a BR319.

A cidade foi construída às margens do rio Madeira e o crescimento ocorreu nas direções leste, sul e norte da cidade. Na figura 1, consta a área urbana da cidade de Porto Velho dividida em cinco zonas principais: Centro, Norte, Sul, Leste e Oeste. Na **zona Norte** existe os seguintes bairros: Área Militar e Aeroporto, Nova Esperança, Nacional, Panair, Pedrinhas, Costa e Silva, São Sebastião, São João Bosco, São Cristovão, Olaria, Nova Porto velho, Industrial, Rio Madeira, Aponiã, Flodoaldo Pontes Pinto e Embratel . A **zona Sul** compreende os seguintes bairros: Floresta, Eldorado, Nova Floresta, Eletronorte, Cohab, Conceição, Caladinho, Castanheira, Aeroclube, Areia Branca, Cidade do Lobo, Novo Horizonte e cidade Nova. Os bairros que formam a **zona Leste** são: Planalto, Teixeirão, Esperança da Comunidade, Igarapé, Pantanal, Escola de Polícia, Cuniã, Jardim Santana, Socialista, Tiradentes, Agenor de Carvalho, Tancredo Neves, Lagoinha, Juscelino Kubistchek, Três Marias, Ulisses Guimarães, Mariana, São Francisco, Cascalheira, Ronaldo Aragão, Marcos Freire e Cidade Jardim. A **zona Oeste** contempla os seguintes bairros: Nossa Senhora das Graças, KM-1, Roque, Mato Grosso, Baixa União, Arigolândia, Areal, Tucumanzal, Tupi, Militar, Triângulo e Caiari.

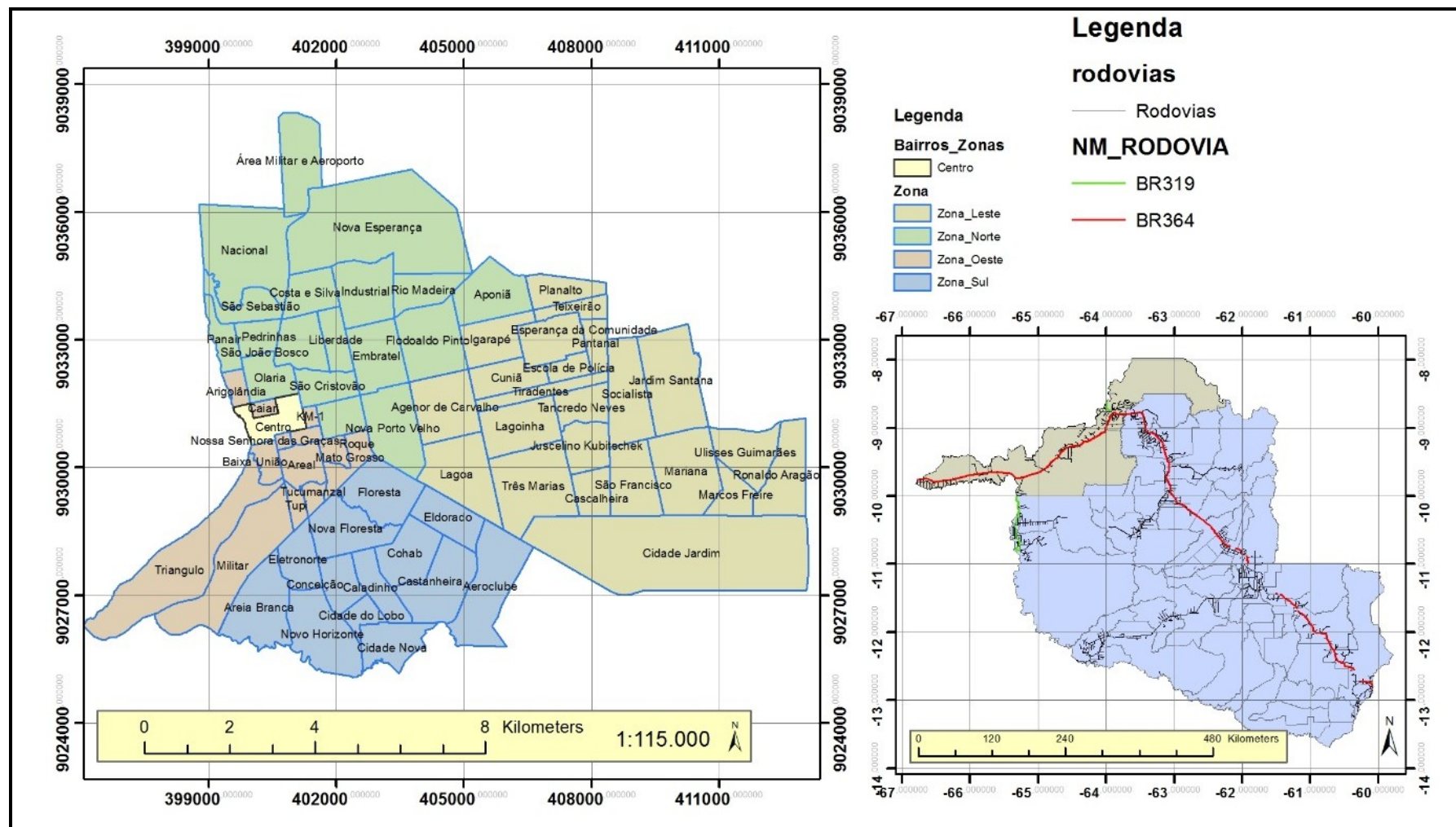


Figura 1. Bairros sobre a mancha urbana de Porto Velho
 Fonte: Adaptado de Sempla (2007)

1.2. Contexto geológico regional

A área de estudo deste trabalho, que pertence ao perímetro urbano de Porto Velho, capital do Estado de Rondônia está inserida na porção noroeste do segmento da crosta continental definido como Província Estrutural Tapajós (ALMEIDA et al, 1977, apud ADAMY e ROMANINI, 1990), parte integrante de uma entidade geotectônica maior designada Cráton Amazônico. O Cráton Amazônico tem seus limites ocidentais e setentrionais encobertos pelos sedimentos fanerozóicos, enquanto seus quadrantes meridional e oriental são demarcados pelo Cinturão Móvel Paraguai-Araguaia (ADAMY e ROMANINI, 1990).

O Cráton Amazônico foi dividido em duas províncias: Rio Branco e Tapajós, distinguindo nessa última as subprovíncias Carajás, Xingu e Madeira, cada uma com características peculiares no quadro de sua evolução tectonogeológica. Essa divisão permite uma abordagem mais regionalizada (ALMEIDA et al, 1977; apud AMARAL, 1984).

A Subprovíncia Madeira abrange a totalidade do Estado de Rondônia, o sul do Estado do Amazonas, o norte do Estado de Mato Grosso e oeste do Estado de Mato Grosso do Sul. Seu limite oriental é colocado tentativamente junto à grande falha que limita, a sudoeste, as coberturas sedimentares e rochas vulcânicas da região da serra do Cachimbo. Seus limites norte e oeste são as bacias do alto Amazonas e Acre, bem como a Cordilheira Cisandina. Seu limite sul é mascarado pelas coberturas cenozóicas dos altos cursos dos rios Guaporé, Tapajós e Paraguai. Em algumas áreas, esse contato é observado com as rochas deformadas da Faixa de Dobramentos Paraguai, coincidente com o limite sul do Cráton Amazônico (ADAMY e ROMANINI, 1990).

A área amostrada para o desenvolvimento deste trabalho envolveu três unidades litoestratigráficas: Formação Jaciparaná, Lateritos Imaturos e Complexo Jamari, descritas aqui de forma abreviada, de acordo com o exposto em Adamy e Romanini (1990).

No trabalho de Adamy e Romanini (1990), sobre a geologia da região de Porto Velho – Abunã constam quatro Folhas: Folha Porto Velho que abrange área de 3.025 km² e corresponde a carta planimétrica SC.20-V-B-V; Folha Jaciparaná que abrange área de 3.025 km² e corresponde a carta planimétrica SC.20-V-D-I; Folha Abunã que abrange área de 2.455 km² e corresponde a

carta planimétrica SC.20-V-C-V; e Folha Mutumparaná que abrange área de 3.025 km² e corresponde a carta planimétrica SC.20-V-C-VI. A Folha Porto Velho abrange toda área urbana de Porto Velho, onde foram realizadas as coletas de amostras de água para realização deste trabalho.

1.2.1. Formação Jaciparaná

A Formação Jacipará é uma unidade litostratigráfica que se desenvolve notadamente sobre as áreas cratonizadas, disposta discordantemente sobre rochas do Complexo Jamari, dos corpos graníticos intrusivos e dos depósitos terciários da Formação Solimões.

Sobre a Formação Jaciparaná foi esculpido um relevo bastante homogêneo, sem grandes desníveis altimétricos, constituindo, uma área acentuadamente deprimida, onde predominam interflúvios tabulares com intensidade de aprofundamento de drenagem muito fraca.

O rio Madeira, principal curso d' água que drena essa área, está atualmente recortando e retrabalhando esses sedimentos quaternários mais antigos, com uma planície fluvial holocênica muito ampla, onde a diferenciação entre terraços antigos e recentes torna-se difícil em alguns pontos.

Na Folha Porto Velho os depósitos pleistoceno-holocênicos dominam toda a porção centro-norte da área, com limites que se estendem para norte, além da folha, e apresentam contatos interpenetrados pouco claros com o material areno-argiloso produzido pelo retrabalhamento físico-químico dos lateritos que se desenvolveram sobre o Complexo Jamari é igualmente expressiva, porém menos homogênea na sua expressão em área.

Essa unidade sedimentar encontra-se depositada discordantemente sobre as rochas do Complexo Jamari, sendo em alguns pontos de difícil distinção da Formação Solimões sua espessura máxima é da ordem de 50m, determinada por uma média estabilidade a partir de inúmeros poços tubulares para captação de água subterrânea. As suas camadas recobrem discordantemente as rochas do embasamento cristalino e os granitos nele intrusivos.

Nas seções dessa unidade sedimentar subatual, observadas em alguns cortes fluviais e areias espalhados pela área constataram-se depósitos colúvio-aluviais e fluviais oriundos de rios meandantes e entrelaçados (“braided”). São sedimentos geneticamente associados a processos erosivos deposicionais relacionados com a alternância de período de clima tropical úmido e seco desde o Pleisceno Inferior até o Holoceno.

Em decorrência, formaram-se depósitos interrelacionados, muitas vezes de individualização cartográfica difícil que, em função dessa ciclicidade climática mostram fácies nitidamente colúvio-aluviais relacionadas a movimento de massa de caráter subaéreo, e fácies fluviais subaquosas.

A fácies fluviais predomina na maior parte das exposições e representa registros ligados a deposições de rios meandantes e entrelaçados dentro de um quadro de alternância climática entre o úmido e o seco. A fácies colúvio-aluvial está relacionada com o relevo base pediplanado e constitui a base da sequência. Dentro da fácies fluvial foram caracterizados depósitos acumulados por rios de padrão entrelaçados e rios de padrão meandrante. As acumulações fluviais mais comuns foram caracterizadas como depósitos de barra em pontal, residuais de canal e de transbordamento, ligados a vários ciclos fluviais de rios meandrante.

Os depósitos de barra em pontal são compostos por sedimentos conglomeráticos na base, os quais podem ocorrer como pequenas intercalações, passando por sedimentos arenosos com granulometria decrescente da base para o topo (desde areia grossa a muito grossa até silte), finalmente o ciclo com sedimentos pelíticos. No topo gradam para depósitos de transbordamento.

As areias normalmente são imaturas, conglomeráticas, raramente bem selecionadas, friáveis, quartzosas, com grãos angulosos a subarredondados. Ocorrem também areias feldspáticas com matriz argilosa e arenitos ferruginizados relacionados a processos de “seepage”. As estruturas sedimentares mais frequentes são a maciça, a planoparalela horizontal e subhorizontal, e as estratificações cruzadas de pequena e grande amplitude dos tipos tabular, tangencial e acanalada. Esses depósitos mostram, normalmente, cores avermelhadas e amareladas, devido às concentrações de óxidos e hidróxidos de ferro, relacionados aos processos de laterização que se estabeleceram sobre esses sedimentos.

A notável variação lateral e vertical e a complexidade natural desses depósitos quaternários, somadas ao fato de que é inexpressiva a parte das sequências expostas em superfície, dificultam a análise e a necessária subdivisão dessa sequência sedimentar.

Nas exposições observadas ao longo dos rios, estradas e areais, foram identificados depósitos fluviais (rios entrelaçados a meandranes), associados com acumulações relacionadas a movimentos de massa colúvio-aluviais (depósitos de fluxo de detritos e pequenos leques coalescentes), associados com acumulações relacionadas a movimentos de massa colúvio-aluviais (depósitos de fluxo de detritos e pequenos leques coalescentes).

As dimensões dos depósitos fluviais encontrados são semelhantes às das planícies fluviais atuais, evidenciando que os rios da região, na época, tiveram grandes dimensões, de caráter notadamente meandranes no caso dos depósitos superiores das sequências, e puderam divagar amplamente numa vastíssima área pediplanada formada em condições de clima tropical seco no Pleistoceno Superior.

1.2.2. Lateritos imaturos

Os lateritos imaturos representam a quase-totalidade dos termos aflorantes na região de Porto Velho – Abunã e se estendem até a parte oriental do Estado do Acre.

De certa forma, associados com os lateritos, são encontrados, no interior de perfis e barrancos de rios e igarapés, arenitos ferruginizados, por vezes manganésitos, tipo “seepage” e “ironstones” de contato/interface litológico, que não representam processos lateríticos.

As coberturas lateríticas ocorrem em toda a área de estudo e estão distribuídas de forma aleatória, obedecendo simplesmente aos processos que levaram à formação de um relevo profundamente dissecado. De modo geral, os lateritos mostram a seguinte distribuição: 20% da área mapeada na Folha Abunã; 40% da Folha Porto Velho; 30% da Folha Mutumparaná; e 10% da Folha Jaciparaná.

Os lateritos imaturos têm a sua parte superior (horizonte concrecionário) em geral aflorante, configurando a parte mais elevada do relevo quase plano a moderadamente ondulado.

Em certas áreas, onde a parte superior está espessa e endurecida, e houve maior entalhamento da drenagem, observa-se a formação de um relevo tendendo a platôs. Nas encostas aflora a parte mediana dos perfis lateríticos (horizonte mosqueado), podendo estar parcialmente recoberta por colúvios/alúvios areno-argilosos. Esses depósitos colúvio-aluviais, na sua base, são constituídos por seixos provenientes dos próprios lateritos concrecionários, formando corpos tipo “Stone-layer”, e no topo por material argiloso proveniente do horizonte mosqueado.

Os lateritos, de acordo com a abordagem moderna, devem ser descritos como um importante grupo de rochas, pois além de ocuparem expressiva parcela da superfície da crosta terrestre, tomando-se assim mapeáveis, são caracterizados pelas diversas feições como cor, texturas, estruturas, composição mineralógica e química, ambiental de formação, tempo de formação e idade. Podem ser indicadores de mineralização ou estarem mineralizados e prestam informações importantes sobre a evolução dos diferentes terrenos geológicos. Distinguem-se dos outros tipos litológicos pela estruturação em horizontes, mineralógica e quimicamente distintos, além dos aspectos textuais, estruturais e de outras propriedades físicas.

Os lateritos imaturos representam lateritos com baixo grau evolutivo. Os do tipo plintitos e petroplintitos distinguem-se facilmente dos lateritos de alto grau de evolução (em geral fósseis) e se equivalem aos perfis lateríticos tipo saprólito, abundantes no Centro-Sul do Brasil. As diferenças fundamentais são em termos de texturas, estruturais, horizontais, mineralogia e maior diferenciação na distribuição dos elementos químicos no perfil.

Na região estudada, os lateritos imaturos apresentam um perfil geológico simples, consistindo de horizontes bem definidos, a saber: horizonte de solo, no topo; horizonte concrecionário; horizonte mosqueado; horizonte pálido; e rocha-mãe, na base.

Os lateritos imaturos, que se estendem por toda a região estudada e modelam grande parte do relevo atual, começaram a se formar no Terciário, atingindo provavelmente maior desenvolvimento no Pleistoceno e Holoceno, a partir da laterização dos litótipos do Complexo Jamari, granitos Rondonianos, tipo Serra da Providência, sedimentos, rochas sedimentares das formações São Lourenço e Palmeiral, dos lateritos maduros e das rochas sedimentares pliopleistocênicas argilo-arenosas.

1.2.3. Complexo Jamari

O complexo Jamari constitui uma das unidades litostratigráficas de maior expressão na área de Porto Velho, sendo que sua maior ocorrência situa-se na Folha Mutumparaná (70% da área total). Nesta folha aflora em porção meridional junto às cabeceiras dos rios São Francisco, Contra e Mutumparaná, e na sua porção setentrional, próximo à fazenda Rio Madeira, onde ocorre interceptada por falhas NNW-SSE e E-W, e está recoberta por rochas sedimentares da Formação em discordância erosiva.

Na Folha Porto Velho, o Complexo Jamari tem exposição mais pronunciada nos leitos dos rios Madeira, das Garças, Preto e Candeias, em forma de ilhas de matacões e lajeados, visíveis nas épocas de estiagem.

O embasamento regional mais antigo e remobilizado está representado por sequência infracrustal de relativa diversidade litológica. Representa a unidade cronolitostratigráfica mais significativa por sua extensão superficial, mostrando evidências textuais e estruturais de metamorfismo e deformação polifásica, associadas aos processos de migmatização. Integrando os seus litótipos foram identificados anfíbolitos, gnaisses, sienogranitos, adamelitos, augengnaisses, migmatitos e granitóides associados intrinsecamente. Como termo predominante, ocorre biotita-gnaisse, de composição granodiorítica e granulação média a localmente grossa, em sítios afetados por mobilização quartzofeldspática, podendo ainda mostrar feições finas, sugerindo uma origem sedimentar ou vulcânica ácida. A textura é granoblástica a mematoblástica rica em minerais ferromagnesianos, notadamente biotita, com coloração variável desde tons róseos a mosqueados. Essas rochas estão atravessadas por diques de granito fino, de esquema variável e de comportamento irregular. Frequentemente mostram estruturas comuns aos migmatitos (oftálmica, “schlieren”), podendo estar associadas aos processos de anatexia e migmatização.

É comum, ao longo de zonas cisalhadas, ocorrerem augengnaisses, cujo bandamento é superposto à textura porfirítica. Modernamente, essa situação é interpretada como representando corpos graníticos intrusivos ao longo de zonas de cisalhamento (“shear zone”). O posicionamento granítico é sin-tarditectônico, sob condições de pressão não hidrostática, superpondo-se texturas e estruturas ígneas e deformativas. Associado a esses litótipos aflora quartzodiorito, sob forma de

corpo grosseiramente oval, com cerca de 10 km de eixo maior, na desembocadura do rio Cutia. A rocha, quando alterada, origina um solo argiloso avermelhado.

De um modo geral, o Complexo Jamari é representado por rochas de composição adamelítica e mais raramente, sienogranítica, exibindo larga faixa de variação granulométrica e uma extrema variabilidade nas taxas de deformação, observando-se diferentes intensidades de anisotropia estrutural, materializadas pelo desenvolvimento de gnaisses foliados, protomiloníticos a miloníticos.

Entre os tipos petrográficos dominantes o quartzo, o feldspato alcalino e o plagioclásio são elementos majoritários, tendo como biotita e hornblenda os varietais mais comuns. Opacos, allanita e zircão são os minerais acessórios mais frequentes.

O Complexo Jamari é constituído por rochas polimetamórficas, como gnaisses, charnoenderbitos, anfibolitos, migmatitos e granulitos, havendo zonas graníticas e/ou granodioríticas, e faixas de quartzodioritos, com metamorfismo nas fácies anfibolito e granulito.

Na figura 2 consta o mapa geológico da área urbana de Porto Velho, incluindo coluna litoestratigráfica e os pontos onde foram coletadas as 141 amostras para realização deste trabalho.

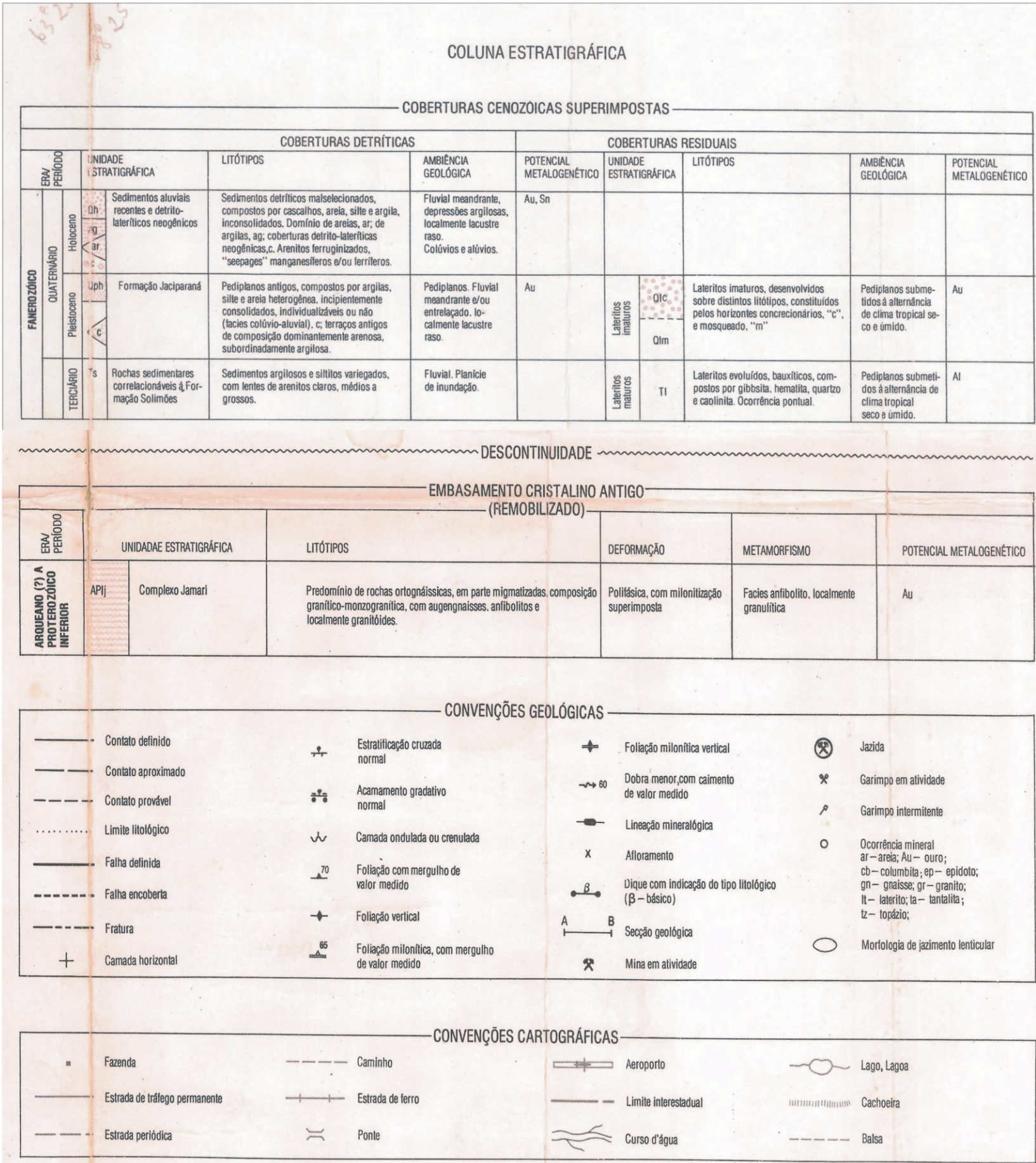
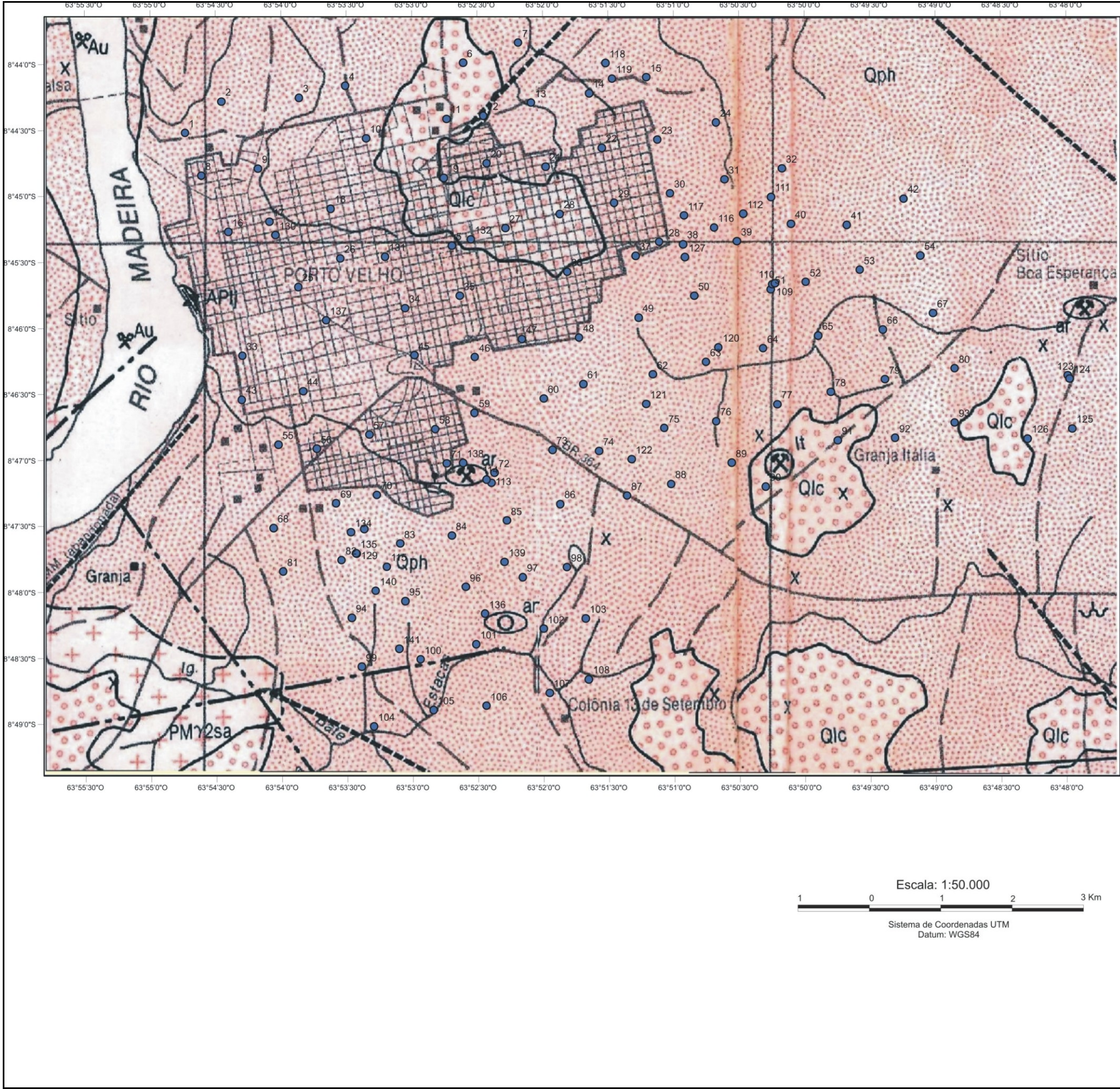


Figura 2. Mapa geológico da área de estudo
Fonte: Adaptado de Adamy e Romanini (1990)

2. REVISÃO DE CONCEITOS E TERMINOLOGIAS

O estudo sobre o aproveitamento de águas subterrâneas antecede a era cristã. No contexto das ciências da Terra, as águas subterrâneas são objetos de estudo da hidrogeologia, que por sua vez é um ramo da geologia, sendo esta uma compreensão inicialmente adotada pelo inglês Joseph Lucas na segunda metade do século XIX. A palavra hidrogeologia, no entanto, foi criada pelo francês Jean-Baptiste de Lamarck, no início deste mesmo século, para fazer a descrição do papel da água na morfologia da superfície terrestre (MANOEL FILHO, citado por FEITOSA et al., 2008). A perfuração de poços foi a principal atividade sobre estudos de águas subterrâneas no Brasil, na primeira metade do século XX, sendo estas atividades concentradas na região Nordeste, desvinculadas de um projeto de gestão para as águas dessa região. Estas atividades foram inicialmente conduzidas pela IFOCS – Inspetoria Federal de Obras Contra as Secas que, posteriormente, foi denominada de DNOCS – Departamento Nacional de Obras Contra as Secas.

Com as crescentes demandas do setor de recursos hídricos e evolução de várias ações de diversos segmentos governamentais, associadas aos setores privados, a CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais) - Serviço Geológico do Brasil, empresa pública vinculada ao Ministério das Minas e Energia, implantou o Sistema de Informações de Águas Subterrâneas – SIAGAS. Posteriormente, com o propósito inicial de armazenar informações sobre o nível das águas foi implantada a Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas – RIMAS. O SIAGAS foi implantado a partir de 1995 (NASCIMENTO et al., 2008).

A partir de 1970, a CPRM passou a ter uma sede em Porto Velho, quando de fato as atividades de pesquisa em recursos hídricos, de forma institucional em Rondônia, registrou seu início e, até o presente a CPRM – Serviço Geológico do Brasil é o órgão que mais desenvolve pesquisa em recursos hídricos, o que o torna em um ambiente de referência nesta área. Em 1982 foi instituída a Universidade Federal de Rondônia - UNIR, a partir de uma estrutura acadêmica do extinto Núcleo da Universidade Federal do Pará. Com a evolução da quantidade de cursos e do quadro de docentes, a UNIR passou a desenvolver pesquisas em recursos hídricos, com maior ênfase no final dos anos 90 do século XX.

2.1. Pesquisa em hidrogeologia

Em função das diversas metodologias adotadas para captação, tratamento, uso e devolução de águas aos mananciais; tornou-se cada vez mais acentuada a preocupação com a **exploração** (pode ser definida como conjunto de operações ou estudos, que permite a localização e a caracterização de aquíferos, sobre os quais se podem obter água em quantidade e qualidade adequadas ao fim pretendido) e a **exploração** (exploração racionalmente planejada conduz a uma otimização do aproveitamento dos recursos hídricos subterrâneos) de águas. Não existe limite entre exploração e exploração (FEITOSA e FEITOSA, apud FEITOSA et al., 2008), esta afirmação reforça a preocupação sobre qual tipo de estudo deve ser adotado quando se pretende realizar uma exploração de água subterrânea e; neste contexto, não existe senso comum na comunicada científica, por isto, para este trabalho será adotada a concepção descrita em Custódio e Llamas (FEITOSA e FEITOSA, apud FEITOSA et al., 2008), que adotaram três grandes áreas de estudo na exploração de águas subterrâneas: **(a) Estudos Preliminares ou de Reconhecimento** - Têm como objetivo principal a identificação dos aquíferos mais importantes e de suas áreas de recarga e descarga, a verificação da qualidade das águas e uma primeira estimativa das suas geometrias e parâmetros hidrodinâmicos; **(b) Estudos Gerais ou de Vulnerabilidade** - Envolvem trabalhos de campo específico onde, basicamente, consta um inventário sistemático de pontos de água, geofísica, poços de pesquisa, testes de aquífero e análises químicas e; **(c) Estudos Detalhados** - Têm por objetivo o conhecimento detalhado de um aquífero de modo a permitir o atendimento de uma demanda real como, por exemplo, o abastecimento de um núcleo urbano, de uma fábrica ou o suprimento de água para irrigação.

Conforme descrição das áreas de estudos sobre águas subterrâneas, este trabalho tem enquadramento como estudos preliminares, focado em verificação da qualidade das águas.

2.2. Qualidade das águas subterrâneas

Em hidrogeologia a quantidade e a qualidade das águas têm importâncias similares. Sobre a qualidade das águas subterrâneas, esta é uma preocupação existente na área de hidrogeoquímica que, por sua vez, estuda as características químicas das águas que refletem os meios por onde

percolam, armazenando informações associadas aos tipos de rochas drenados e aos produtos resultantes das atividades humanas (PEREIRA, 2009).

A qualidade da água subterrânea nos meios urbanos está fortemente associada a forma de ocupação e uso dos solos, juntamente com a metodologia adotada para a exploração deste recurso. Sobre a gestão das águas subterrâneas existem preocupações que estão diretamente relacionadas com a qualidade: **(a)** construção de poços sem adequação técnica, posteriormente transformada em fonte de contaminação; **(b)** superexploração, decorrente do adensamento populacional combinado com o crescimento desordenado da quantidade de poços; **(c)** redução do volume de água nas áreas de recarga, em função de atividades antrópicas, por exemplo, as construções civis que promovem impermeabilização dessas áreas e; **(d)** contaminação dos aquíferos, decorrentes das construções dos lixões, das indústrias, dos postos de combustíveis, do uso de agrotóxicos na agricultura e de atividades no setor mineral.

Uma das formas de identificar a qualidade das águas subterrâneas é a utilização de índices que envolvem alguns parâmetros e, neste contexto, para os cálculos do IQUAS - índice de qualidade de água subterrânea, Almeida (2007) analisou 13 parâmetros divididos em 8 grupos de índices: I_{BIO} (coliformes termotolerantes) = índice de micro-organismo com peso 0,19; I_{FEMN} (ferro e manganês) = índice ferro e manganês com peso igual a 0,06; I_{MS} (cloreto, dureza, fluoreto, potencial hidrogeniônico, sulfatos) = índice mineração e salinidade com peso 0,19; I_{PS} (turbidez) = índice de partículas em suspensão com peso 0,06; I_{NIT} (nitrato) = índice de nitrato com peso 0,19; I_{AMO} (amônia) = índice de nitrogenado - fora nitrato com peso igual a 0,06; I_{MIN} (mercúrio total) = índice de micropoluentes minerais com peso 0,06; I_{ORG} (benzeno) = índice de micropoluentes orgânicos com peso 0,19, com base na seguinte relação:

Equação 1. Índice de qualidade de água subterrânea - IQUAS

$$IQUAS = (I_{BIO})^{0,19} * (I_{FeMn})^{0,06} * (I_{MS})^{0,19} * (I_{PS})^{0,06} * (I_{Nit})^{0,19} * (I_{Amo})^{0,06} * (I_{Min})^{0,06} * (I_{Org})^{0,19} \quad (1)$$

Para este trabalho não foram analisados os parâmetros de mercúrio total e benzeno; foi feito um ajuste nos pesos após a exclusão do índice de micropoluentes minerais – I_{Min} e do índice de micropoluentes orgânicos – I_{Org} . Neste caso, a soma dos pesos dos índices excluídos (I_{Min} e I_{Org}) é igual a 0,25 e, este valor foi distribuído com aplicação de uma divisão diretamente

proporcional aos pesos dos índices que permaneceram, sendo a constante de proporcionalidade igual a 1/3 e, neste caso, o resto de 1 centésimo foi dividido em duas partes iguais sendo cada uma delas acrescida nos pesos dos índices I_{FeMn} e I_{MS} , por serem os únicos índices constituídos com mais de um parâmetro. Assim, para os cálculos do **IQUAS** - índice de qualidade de água subterrânea deste trabalho a relação adotada foi:

Equação 2. Índice de qualidade de água subterrânea - IQAS

$$IQAS = (I_{Bio})^{0,250} * (I_{FeMn})^{0,085} * (I_{MS})^{0,255} * (I_{PS})^{0,080} * (I_{Nit})^{0,250} * (I_{Amo})^{0,080} \quad (2)$$

Onde:

Equação 3. Índice de microorganismos = I_{Bio}

$$I_{Bio} = \begin{cases} 100 & \text{se } X = 0 = \text{Ausência de coliforme termotolerante} \\ 0 & \text{se } X = 1 = \text{Presença de coliforme termotolerante} \end{cases} \quad (3)$$

Equação 4. Índice de ferro e manganês = I_{FeMn}

$$I_{FeMn} = \left(\begin{matrix} 100 & \text{se } X_{Fe} \leq 0,09 \text{ mg/L} \\ 35,081.(X_{Fe})^{-0,4261} & \text{se } X_{Fe} > 0,09 \text{ mg/L} \end{matrix} \right)^{0,5} * \left(\begin{matrix} 100 & \text{se } X_{Mn} \leq 0,02 \text{ mg/L} \\ 22,847.(X_{Mn})^{-0,3803} & \text{se } X_{Mn} > 0,02 \text{ mg/L} \end{matrix} \right)^{0,5} \quad (4)$$

Equação 5. Índice de mineração e salinidade = I_{MS}

$$\begin{aligned}
 I_{MS} = & \left(\begin{array}{ll} 100 & \text{se } X_{\text{Cloreto}} \leq 51 \text{ mg/L} \\ 596,79.(X_{\text{Cloreto}})^{-0,4553} & \text{se } X_{\text{Cloreto}} > 51 \text{ mg/L} \end{array} \right)^{0,3} * \\
 & * \left(\begin{array}{ll} 100 & \text{se } X_{\text{Dureza}} \leq 10 \text{ mg/L} \\ -13,603.Ln(X_{\text{Dureza}}) + 130,16 & \text{se } X_{\text{Dureza}} > 10 \text{ mg/L} \end{array} \right)^{0,3} * \\
 & * \left(\begin{array}{ll} 20 & \text{se } X_{\text{Fluoreto}} \leq 0,1 \text{ mg/L} \\ 116,79.(X_{\text{Fluoreto}})^{0,7001} & \text{se } 0,1 < X_{\text{Fluoreto}} \leq 0,8 \text{ mg/L} \\ 56,798.(X_{\text{Fluoreto}})^{-1,1589} & \text{se } 0,8 < X_{\text{Fluoreto}} \leq 2 \text{ mg/L} \\ 20 & \text{se } X_{\text{Fluoreto}} > 2 \text{ mg/L} \end{array} \right)^{0,1} * \\
 & * \left(\begin{array}{ll} 20 & \text{se } X_{\text{pH}} < 2,0 \\ 16,1 + 3.X_{\text{pH}} & \text{se } 2,0 \leq X_{\text{pH}} \leq 5,0 \\ 142,67 + 32.X_{\text{pH}} & \text{se } 5,1 \leq X_{\text{pH}} \leq 7,4 \\ 316,96 + 29,2.X_{\text{pH}} & \text{se } 7,5 \leq X_{\text{pH}} \leq 10,0 \\ 98 + 8.X_{\text{pH}} & \text{se } 10,1 \leq X_{\text{pH}} \leq 12,0 \\ 20 & \text{se } X_{\text{pH}} > 12 \end{array} \right)^{0,1} * \\
 & * \left(\begin{array}{ll} 100 & \text{se } X_{\text{Sulfato}} \leq 20 \text{ mg/L} \\ 409,02.(X_{\text{Sulfato}})^{-0,4705} & \text{se } X_{\text{Sulfato}} > 20 \text{ mg/L} \end{array} \right)^{0,2}
 \end{aligned} \tag{5}$$

Equação 6. Índice de partículas em suspensão = I_{PS}

$$I_{PS} = \begin{cases} 100 & \text{se } X_{\text{Turbidez}} \leq 0,2 \text{ NTU} \\ 60,638.(X_{\text{Turbidez}})^{-0,2338} & \text{se } X_{\text{Turbidez}} > 0,2 \text{ NTU} \end{cases} \tag{6}$$

Equação 7. Índice de nitrato = I_{Nit}

$$I_{Nit} = \begin{cases} 100 & \text{se } X \leq 1,5 \text{ mg/L} \\ 115,78.(X_{\text{Nitrato}})^{-0,3314} & \text{se } X > 1,5 \text{ mg/L} \end{cases} \tag{7}$$

Equação 8. Índice de nitrogenados (fora nitrato) = I_{Amo}

$$I_{Amo} = \begin{cases} 100 & \text{se } X \leq 0,1 \text{ mg/L} \\ 56,703.(X_{Amônia})^{-0,2324} & \text{se } X > 0,1 \text{ mg/L} \end{cases} \quad (8)$$

Como o valor do IQAS resulta em um número adimensional no intervalo de zero a cem, a partir de uma adaptação de MMA (2005), este índice foi dividido em quatro classes: Ruim ($0 \leq IQAS \leq 50$), Médio ($50 < IQAS \leq 70$), Bom ($70 < IQAS \leq 90$) e excelente ($90 < IQAS \leq 100$).

2.3. Seleção de parâmetros e tamanho amostral

A preocupação, por diversos segmentos sociais, com contaminação e a poluição das águas tornou-se mais evidente neste século, em função do crescimento da densidade demográfica, da alocação de parques industriais, de serviços de drenagem urbana insuficientes para o suprimento das demandas, dos modelos de produção de alimentos e do modelo de gestão dos recursos hídricos praticado por diversos governos nas esferas municipal, estadual e federal. Na tentativa de contornar as demandas reprimidas com a qualidade de águas, foram estabelecidas as condições mínimas dos teores de diversos parâmetros da água para consumo humano, que são os índices de qualidade de água e, no Brasil já existe legislação em vigor sobre este assunto. Para este trabalho foram estudados apenas 11 desses parâmetros: coliformes termotolerantes, ferro, manganês, cloreto, dureza, fluoreto, potencial hidrogeniônico, sulfatos, turbidez, nitrato e amônia. Estes parâmetros constam na Portaria 2.914/2011 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2011), que estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.

Almeida (2007) apresentou a construção de um índice para qualidade de águas subterrâneas destinadas ao uso na produção de água potável onde fez uso dos onze parâmetros acima mencionados. Sobre esses parâmetros nas águas subterrâneas do município de Porto Velho - RO, já existem trabalhos acadêmicos (BAHIA, 1997; CAMPOS, 1998; MORAIS, 1998; CAMPOS e DREWS, 1999a; 1999b; CAMPOS et al., 2004; LIMA, 2008; RODRIGUES, 2008; ZUFFO et al., 2009), que servirão de referências para análises comparativas.

Os parâmetros de água selecionados para este trabalho estão enfocados a seguir.

2.3.1. Coliformes termotolerantes.

Pertencem ao subgrupo das bactérias do grupo coliforme. Fermentam a lactose a 44,5 °C 0,2°C em 24 horas, tendo como principal representante a *Escherichia coli*, de origem exclusivamente fecal. A bactéria *Escherichia coli* produz indol a partir do triptofano, oxidase negativa, não hidrolisa a ureia e apresenta atividade das enzimas -galactosidase e - glucoronidase, sendo considerada o mais específico indicador de contaminação fecal recente e de eventual presença de organismos patogênicos (Brasil, 2006a).

As bactérias do grupo coliforme estão presentes no intestino humano e de animais de sangue quente e são eliminadas nas fezes em números elevados (entre $10^6/\text{g}$ a $10^8/\text{g}$). Entretanto, o grupo dos coliformes inclui bactérias não exclusivamente de origem fecal, podendo ocorrer naturalmente no solo, na água e em plantas, além disso, principalmente em climas tropicais, os coliformes apresentam capacidade de se multiplicar na água (OMS, 1995).

2.3.2. Ferro e manganês.

Os elementos ferro e manganês, por apresentarem comportamento químico semelhante, podem ter seus efeitos na qualidade da água abordados conjuntamente. Muito embora esses elementos não apresentem inconvenientes à saúde nas concentrações normalmente encontradas nas águas naturais, eles podem provocar problemas de ordem estética (manchas em roupas ou vasos sanitários) ou prejudicar determinados usos industriais da água. De acordo com a Portaria 2.914/2011 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2011), os valores máximos permitidos são de 0,3 mg/L para o ferro e 0,1 mg/L para o manganês. É importante observar, que no caso do Estado de Minas Gerais, em função das características geoquímicas das bacias de drenagem, as águas apresentam, naturalmente, teores elevados de ferro e manganês, que podem até mesmo superar os limites fixados pelo padrão de potabilidade. Altas concentrações desses elementos são também encontradas em situações de ausência de oxigênio dissolvido, como, por exemplo, em águas subterrâneas ou nas camadas mais profundas dos lagos. Em condições de anaerobiose, o ferro e o manganês apresentam-se em sua forma solúvel (Fe^{2+} e Mn^{2+}), voltando a precipitar-se quando em contato com o oxigênio - Fe^{3+} e Mn^{4+} (BRASIL, 2006a).

2.3.4. Cloreto

O cloreto é o ânion Cl^- que se apresenta nas águas subterrâneas, oriundo da percolação da água através de solos e rochas (CETESB, 2009). Para Celligoi (1999), a presença de cloreto em águas subterrâneas pode ser atribuída à dissolução de depósitos salinos, descargas de efluentes de indústrias químicas, intrusões salinas, etc. Os íons cloreto são altamente móveis e não são retidos em rochas permeáveis.

Segundo Fenzl (1988), na litosfera o cloreto é encontrado principalmente nos seguintes minerais: escapolita, sodalita, apatita, micas e anfibólios e feldspatos. Nas argilas o cloreto pode ser encontrado em forma de cristais de NaCl , ou dissolvido nas águas contidas no poros do sedimento. Na atmosfera o Cl^- faz parte dos sais cíclicos e dos aerossóis continentais, de maneira que em zonas costeiras as precipitações atingem teores de até alguns miligramas de Cl^- por litro.

Em condições favoráveis, as concentrações de cloreto nas águas subterrâneas podem ser úteis para determinar a recarga do sistema aquífero; ao se comparar a concentração média de cloreto nas águas subterrâneas com a concentração de cloreto das águas que abastecem o aquífero (SCHOELLER, 1962 apud FENZL, 1986).

Nas águas superficiais são fontes importantes de cloreto as descargas de esgotos sanitários, sendo que cada pessoa expele através da urina cerca de 4 g de cloreto por dia, que representa cerca de 90 a 95% dos excretos humanos e o restante é expelido pelas fezes e suor (WHO, 2009 apud CETESB, 2009). Estas quantidades fazem com que os esgotos apresentem concentrações de cloreto que ultrapassam 15mg/L.

Para as águas de abastecimento público, a concentração de cloreto constitui-se em padrão de potabilidade, segundo a Portaria 2.914/2011 do Ministério da Saúde. O cloreto provoca sabor “salgado” na água, sendo o cloreto de sódio o mais restritivo deles por provocar sabor em concentrações da ordem de 250 mg/L, valor este que é tomado como padrão de potabilidade.

2.4.5. Dureza

Dureza de uma água é a medida da sua capacidade de neutralizar o sabão pelo efeito do cálcio, magnésio ou outros elementos como Fe, Mn, Cu, Ba, Zn, etc. (FENZL, 1986). A origem da dureza das águas pode ser natural, a partir da dissolução de rochas calcárias, ricas em cálcio e magnésio; ou antropogênica, a partir de lançamento de efluentes industriais (BRASIL, 2006a).

A dureza da água é classificada quanto aos cátions e quanto aos ânions associados a estes. Em relação ao cátion, a dureza é classificada em dureza ao cálcio e dureza ao magnésio; a dureza total é soma da dureza ao cálcio com a dureza ao magnésio (PIVELI, 2013). De acordo com o exposto em Brasil (2006a), os cátions mais frequentemente associados à dureza são os de cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}) e, em menor escala, ferro (Fe^{2+}), manganês (Mn^{2+}), estrôncio (Sr^{2+}) e alumínio (Al^{3+}). Quanto ao ânion associado, a dureza temporária da água é causada pela parte do cálcio e do magnésio que se combina com o bicarbonato e o carbonato; ela pode ser eliminada por ebulição; a dureza permanente é causada pela parte do cálcio e do magnésio que se combina com os íons de sulfato, cloreto, nitrato e outros; esta não pode ser eliminada por ebulição. A soma da dureza temporária com a dureza permanente é a dureza total (FENZL, 1986).

Existem evidências de que a ingestão de águas duras contribui para menor incidência de doenças cardiovasculares. Em corpos d'água de reduzida dureza, a biota é mais sensível à presença de substâncias tóxicas, já que a toxicidade é inversamente proporcional ao grau de dureza da água (BRASIL, 2006a).

A dureza da água tem relevante importância nos estudos de controle da qualidade, pois no caso do abastecimento público de água, há indícios da possibilidade de um aumento na incidência de cálculo renal em cidades abastecidas com águas duras, o que traduz um efetivo problema de saúde pública (PIVELI, 2013). A Portaria 2.914/2011 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2011), limita a dureza em 500 mg/L de CaCO_3 como padrão de potabilidade.

2.3.6. Fluoreto

O fluoreto contido nas águas superficiais e subterrâneas, em geral ocorre em concentrações baixas, mas o intemperismo de rochas e o aporte a partir de fontes antropogênicas podem aumentar substancialmente as concentrações. As águas de fontes hidrotermais frequentemente apresentam altas concentrações deste elemento.

É notável o aumento significativo da exposição da população às diversas fontes de flúor, tais como dentifrícios e água de abastecimento público. O flúor ingerido pode ter um papel fundamental na prevenção e controle das cáries dentárias em crianças e adultos. Além disso, dependendo da dose e do tempo de exposição, pode ocasionar intoxicação crônica (SANTIAGO, 2010).

A fluorose dentária é o efeito tóxico mais comum da intoxicação crônica pelo flúor. Caracteriza-se como uma anomalia do desenvolvimento dos dentes, associada a deformações do esmalte que provoca aumento de porosidade, opacidade, manchamento e erosão do esmalte. Além de causar mudanças estéticas nos dentes, com o aparecimento de manchas de cor branca, marrom e até preta em sua superfície. A perda da substância do esmalte pode gerar deformidades anatômicas nos dentes, levando, em alguns casos, à perda dos mesmos. A doença ocorre em consequência da ingestão, por períodos prolongados, de flúor em quantidade acima do limite estabelecido, durante a fase de vida em que o esmalte está em formação, ou seja, do nascimento da criança até a idade dos quatro a cinco anos. Essa ingestão de fluoreto em excesso pode causar uma lesão de hipomineralização, subsuperficial profunda até a superfície do esmalte externo, que, em casos mais severos, se rompe logo após a erupção (FEJERSKOV et al., 1994 citado por SANTIAGO, 2010).

2.3.7. Potencial hidrogeniônico – pH

O pH representa a atividade do íon hidrogênio na água, de forma logaritmizada, resultante inicialmente da dissociação da própria molécula da água e posteriormente acrescida pelo hidrogênio proveniente de outras fontes como efluentes industriais (ácidos sulfúrico, clorídrico, nítrico, etc.), dissociação de ácidos orgânicos como o ácido acético, que resulta da fase ácida da

decomposição anaeróbia da matéria orgânica, bem como outras substâncias que venham apresentar reação ácida com o solvente – água (PIVELI, 2013).

Os valores de pH podem sofrer alterações de forma natural a partir da dissolução de rochas e fotossíntese, ou antropogênica a partir de despejos domésticos e industriais. Em águas distribuídas para consumo humano, baixos valores de pH podem torná-las corrosivas, enquanto valores elevados aumentam a possibilidade de incrustações. A acidificação das águas pode ser também um fenômeno derivado da poluição atmosférica, mediante complexação de gases poluentes com o vapor d'água, provocando o predomínio de precipitações ácidas. Mas também existem ambientes aquáticos naturalmente alcalinos em função da composição química de suas águas, como é o exemplo de alguns lagos africanos nos quais o pH chega a superar o valor de 10 (BRASIL, 2006a).

Os ecossistemas aquáticos naturais estão diretamente influenciados pelo pH devido a seus efeitos sobre a fisiologia das diversas espécies. Também o efeito indireto é muito importante podendo, em determinadas condições de pH, contribuir para a precipitação de elementos químicos tóxicos como metais pesados. Nos sistemas biológicos formados nos tratamentos biológicos de esgotos, o pH é também uma condição que influi decisivamente no processo de tratamento; normalmente, a condição de pH que corresponde à formação de um ecossistema mais diversificado e a um tratamento mais estável é a de pH neutro, tanto em meios aeróbios como nos anaeróbios (CETESB, 2009).

Nas estações de tratamento de águas, são várias as unidades cujo controle envolve as determinações de pH. A coagulação e a floculação que a água sofre inicialmente é um processo unitário dependente do pH. Existe uma condição denominada "pH ótimo" de floculação que corresponde à situação em que as partículas coloidais apresentam menor quantidade de carga eletrostática superficial. A desinfecção pelo cloro é outro processo dependente do pH (CETESB, 2009).

O pH é padrão de potabilidade das águas para abastecimento público e devem apresentar valores entre 6,0 e 9,5, de acordo com a Portaria 2.914/2011 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2011).

2.3.8. Sulfatos

O sulfato é um dos íons mais abundantes na natureza e, em águas naturais, sua fonte ocorre através da dissolução de solos e rochas e pela oxidação de sulfeto (CETESB, 2009).

A decomposição do albumen libera além do amoníaco, pequenas quantidades de ácido sulfídrico (H_2S), que podem sofrer oxidação química ou bacteriana, em condições aeróbicas. O produto final da oxidação microbacteriana é o íon sulfato (SO_4^{2-}), que constitui um nutriente vital e fonte mais importante de enxofre para as plantas verdes. Em meios anaeróbicos, o ácido sulfídrico pode ser produzido por atividade bacteriológica a partir do sulfato; durante este processo o ácido sulfídrico se desprende da água, razão pela qual esta reação é denominada de sulfurização, e tem função muito importante na formação e acumulação de lamas sapropélicas, em lagos e rios (FENZL, 1986).

O enxofre ocorre principalmente em gases magmáticos. A maior parte do elemento nas rochas ocorre em minerais como o gipso – $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ e anidrita - CaSO_4 . Consideráveis quantidades de sulfato são adicionadas ao ciclo hidrológico com as precipitações da atmosfera. Nas águas subterrâneas circulantes em rochas ígneas, a concentração de sulfato é baixa ($< 30 \text{ mg/L}$), mas em rochas evaporíticas pode existir altas concentrações (CELLIGOI, 1999).

O enxofre é um constituinte importante da matéria orgânica e suas reações de oxidação e de redução são muitas vezes ligados a processos biológicos. Por exemplo: em condições naturais, a redução do sulfato requer a participação de microorganismos (FENZL, 1986).

As principais fontes antropogênicas de sulfato nas águas superficiais são as descargas de esgotos domésticos e efluentes industriais. Nas águas tratadas, é proveniente do uso de coagulantes. É importante o controle do sulfato na água tratada, pois a sua ingestão provoca efeito laxativo. No abastecimento industrial, o sulfato pode provocar incrustações em caldeiras e trocadores de calor. Em rede de esgoto com trechos de baixa declividade e existência de depósito de matéria orgânica, o sulfato pode ser transformado em sulfeto, ocorrendo a exalação do gás sulfídrico, que resulta em problemas de corrosão em coletores de esgoto de concreto e odor, além de ser tóxico (CETESB, 2009).

2.3.9. Turbidez

A turbidez da água pode ser definida como a medida do grau de interferência à passagem da luz através do líquido. A alteração à penetração da luz na água é causada pela presença de material em suspensão, sendo expressa por meio de unidades de turbidez (BRASIL, 2006a).

A causa da turbidez na água pode ser provocada também pela presença de algas, plâncton, matéria orgânica e outras substâncias como zinco, ferro, manganês e areia, resultantes do processo natural de erosão ou despejos domésticos e industriais (BRASIL, 2006b).

A turbidez dos corpos d'água é particularmente alta em regiões com solos erodíveis, onde a precipitação pluviométrica pode contribuir para o carreamento de partículas de argila, silte, areia, fragmentos de rocha e óxidos metálicos do solo. Grande parte das águas de rios brasileiros é naturalmente turva em decorrência das características geológicas das bacias de drenagem, ocorrência de altos índices de pluviometria e uso de práticas agrícolas muitas vezes inadequadas (BRASIL, 2006a).

No processo de tratamento a água com turbidez elevada e dependendo de sua natureza, forma flocos pesados que decantam mais rapidamente do que a água com baixa turbidez; isto caracteriza uma importância da turbidez. A turbidez elevada também possui suas desvantagens como no processo de desinfecção que pode ser dificultada pela proteção que pode dar aos microorganismos no contato direto com os desinfetantes (BRASIL, 2006b).

Devido sua importância, a turbidez é um indicador sanitário e padrão de aceitação da água para consumo humano. De acordo com a Portaria 2.914/2011 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2011), o valor máximo permitido (VMP) para águas subterrâneas desinfetadas e água resultante de filtração lenta é de 1,0 unidade de turbidez, para água filtrada após tratamento completo ou filtração direta o VMP é de 0,5 unidade de turbidez; e como padrão de aceitação para consumo humano o VMP é de 5,0 unidades de turbidez.

2.3.10. Nitrato e amônia

O nitrogênio ocorre principalmente na atmosfera, nos solos e em substâncias orgânicas. Na presença de oxigênio, o nitrogênio biológico é sucessivamente oxidado para: amônia, nitrito e finalmente nitrato. Na litosfera o nitrogênio é um elemento com pouca representação e se encontra, sobretudo, nas argilas e rochas argilosas (FENZL, 1986).

No meio aquático, o elemento químico nitrogênio pode ser encontrado sob diversas formas: (i) o nitrogênio molecular (N_2): está continuamente sujeito a perdas para a atmosfera; algumas espécies de algas conseguem fixar o nitrogênio atmosférico, o que permite seu crescimento mesmo quando as outras formas de nitrogênio não estão disponíveis na massa líquida; (ii) nitrogênio orgânico: constituído por nitrogênio na forma dissolvida (compostos nitrogenados orgânicos) ou particulada (biomassa de organismos); (iii) íon amônia (NH_4^+): forma reduzida do nitrogênio, sendo encontrada em condições anaeróbicas; serve como indicador do lançamento de esgotos de elevada carga orgânica; (iv) íon nitrito (NO_2^-): forma intermediária do processo de oxidação, apresentando uma forte instabilidade no meio aquoso; e (v) íon nitrato (NO_3^-): forma oxidada de nitrogênio, encontrada em condições de aerobiose (BRASIL, 2006a).

São diversas as fontes de nitrogênio nas águas naturais. Os esgotos sanitários constituem em geral a principal fonte de proveniência de nitrogênio, lançando nas águas nitrogênio orgânico devido à presença de proteínas e nitrogênio amoniacal, devido à hidrólise sofrida pela uréia na água. Alguns efluentes industriais também concorrem para as descargas de nitrogênio orgânico e amoniacal nas águas, como algumas indústrias químicas, petroquímicas, siderúrgicas, farmacêuticas, de conservas alimentícias, matadouros, frigoríficos e curtumes. A atmosfera é outra fonte importante de nitrogênio devido a diversos mecanismos, fixação biológica desempenhada por bactérias e algas, que incorporam o nitrogênio atmosférico em seus tecidos, contribuindo para a presença de nitrogênio orgânico nas águas. A fixação química, reação que depende da presença de luz, concorre para as presenças de amônia e nitratos nas águas. As lavagens da atmosfera poluída pelas águas pluviais concorrem para as presenças de partículas contendo nitrogênio orgânico bem como para a dissolução de amônia e nitratos. Nas áreas agrícolas, o escoamento das águas pluviais pelos solos fertilizados também contribui para a

presença de diversas formas de nitrogênio. Também nas áreas urbanas, as drenagens de águas pluviais associadas às deficiências do sistema de limpeza pública, constituem fonte difusa de difícil caracterização (CETESB, 2009).

Como visto, o nitrogênio pode ser encontrado nas águas nas formas de nitrogênio orgânico, amoniacal, nitrito e nitrato. As duas primeiras chamam-se formas reduzidas e as duas últimas, formas oxidadas. Pode-se associar a idade da poluição com a relação entre as formas de nitrogênio. Ou seja, se for coletada uma amostra de água de um rio poluído e as análises demonstrarem predominância das formas reduzidas significa que o foco de poluição se encontra próximo. Se prevalecer nitrito e nitrato, ao contrário, significa que as descargas de esgotos se encontram distantes. Nas zonas de autodepuração natural em rios, distinguem-se as presenças de: nitrogênio orgânico na zona de degradação; amoniacal na zona de decomposição ativa; nitrito na zona de recuperação e nitrato na zona de águas limpas (CETESB, 2009).

Pela Resolução 357/2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (BRASIL, 2012), o nitrogênio amoniacal é padrão de classificação das águas naturais e padrão de emissão de esgotos. A amônia é um tóxico com muita restrição à vida dos peixes, sendo que muitas espécies não suportam concentrações acima de 5 mg/L. Além disso, como visto anteriormente, a amônia provoca consumo de oxigênio dissolvido das águas naturais ao ser oxidada biologicamente, a chamada DBO (demanda biológica de oxigênio) de segundo estágio. Por estes motivos, a concentração de nitrogênio amoniacal é importante parâmetro de classificação das águas naturais e normalmente utilizado na constituição de índices de qualidade das águas (CETESB, 2009).

Os nitratos são tóxicos e causam uma doença chamada metahemoglobinemia, que é letal para crianças; o nitrato reduz-se a nitrito na corrente sanguínea, competindo com o oxigênio livre, tornando o sangue azul (CETESB, 2009). Por isto, o nitrato é padrão de potabilidade da água para consumo humano, e de acordo com a Portaria 2.914/2011 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2011), o valor máximo permitido é de 10 mg/L.

2.4. Geoestatística: A técnica e algumas aplicações

A Geoestatística está fundamentada na aplicação da teoria das variáveis regionalizadas para estimar processos ou fenômenos geológicos no espaço (MATHERON, 1965, apud CALVETE e RAIMIRÉZ, 1990). Se uma variável distribuída no espaço apresentar uma estrutura de correlação, então ela é dita regionalizada. Os teores de cloreto, de potencial hidrogeniônico, dos resíduos totais, da dureza, do flúor e do nitrato, em um aquífero, são exemplos de variáveis regionalizadas. Após sua criação, pelo francês Georges Matheron, no início da década de 1960, este ramo de conhecimento evoluiu e atualmente sua aplicação abrange diversas áreas, como por exemplo, Climatologia, Geologia Ambiental, Geotecnia, Hidrogeologia, Hidrologia, Pedologia e Saúde, entre outros.

As técnicas geoestatística podem ser utilizadas para descrever e modelizar padrões espaciais, para predizer valores em locais não amostrados a partir de amostras vizinhas, para obter a incerteza associada a um valor estimado em locais não amostrados e para otimizar malhas de amostragem (ANDRIOTTI, 2004).

Com base na metodologia geoestatística pode-se realizar uma análise da estrutura e da dependência espacial, a partir da forma do semivariograma com seus respectivos parâmetros (C =variância espacial, C_0 =efeito pepita, $C + C_0$ =patamar, A =alcance). Tanto a estrutura quanto a dependência espacial entre os valores observados podem ser expressas pela relação

Equação 9. Semivariograma

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \cdot \text{Var} [Z(x+h) - Z(x)] \quad (9)$$

onde a função $\gamma(h)$ é definida como semivariograma ou função intrínseca (ISAACS e ISRIVASTAVA, 1989).

A estimativa da dependência entre amostras vizinhas no espaço pode ser realizada através da autocorrelação que é de grande utilidade quando se realiza amostragem em uma direção. Quando a amostragem envolve duas direções, o uso de semivariograma é indicado para o estudo da dependência espacial entre amostras. O semivariograma serve para analisar o grau de

dependência espacial entre amostras dentro de um campo experimental (SALVIANO, 1996). Ele é definido a partir da variância das medidas feitas em amostras espaçadas no campo de determinada distância h - “lag” (WEBSTER e OLIVER, 1990). Existem três tipos de semivariograma: o semivariograma observado ou experimental, obtido a partir do conjunto de amostras derivadas da amostragem é, portanto, o único conhecido; o semivariograma verdadeiro, real, sempre desconhecido; e o semivariograma teórico, que é um variograma de referência (GUERRA, 1988).

Assim, um dos principais objetivos de um estudo variográfico (estrutural) é identificar qual semivariograma teórico melhor se ajusta ao semivariograma experimental, de tal modo que, a partir desse modelo teórico, possam ser feitas estimativas.

Para Journel e Huijbregts (1978), uma estimativa para $\gamma(h)$ definido na relação (10) é dada por $\hat{\gamma}(h)$:

Equação 10. Estimativa do semivariograma

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{\sum_{i=1}^{n(h)} [z(x_i + h) - z(x_i)]^2}{2n(h)} \quad (10)$$

onde:

$\hat{\gamma}(h)$ é valor estimado do semivariograma calculado na medida (intervalo) h ,

$z(x_i)$ é o valor da variável regionalizada no ponto x_i ,

$z(x_i + h)$ é o valor da variável regionalizada no ponto $x_i + h$,

$n(h)$ é o número de pares de valores separados entre si pela medida $|h|$ na direção desse vetor.

Num semivariograma $\gamma(h)$, segundo Guerra (1988), o grau de aleatoriedade presente nos dados pode ser calculado pela relação $E = C_0/C$, sendo que, para $E < 0,15$ a componente aleatória é considerada pequena, para $0,15 \leq E \leq 0,30$ a componente é significativa e, para $E > 0,30$ a componente é muito significativa. O grau de dependência espacial (GDE) das variáveis também pode ser classificado de acordo com Cambardella et al. (1994), no qual são considerados de fraca

dependência $[[C_0/(C_0 + C)] > 0,75]$, de moderada $[0,25 < [C_0/(C_0 + C)] \leq 0,75]$ e de forte dependência espacial $[[C_0/(C_0 + C)] \leq 0,25]$.

A figura 3 (adaptada de GUERRA, 1988; MANZIONE, 2002; BRAGA, 1990) a seguir mostra um gráfico com as feições de um semivariograma.

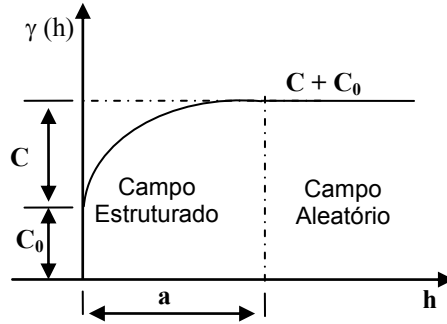


Figura 3. Semivariograma esquemático

Fonte: Adaptada de Guerra (1988), Manzione (2002) e Braga (1990)

Na figura 3: $\gamma(h)$ =semivariograma; C =variância espacial; C_0 =efeito pepita; $C+C_0$ =patamar; a =alcance; h =intervalo entre amostras.

Com os dados experimentais, pode-se realizar um ajuste a um modelo teórico. Entre os diversos modelos teóricos existentes, os mais comuns são os modelos com assíntota ao patamar (esférico, exponencial e gaussiano) e sem patamar (potencial).

a) Modelos com patamar:

Equação 11. Modelo esférico

$$\hat{\gamma}(h) = \begin{cases} C_0 + C \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right], & h < a \\ C_0 + C, & h \geq a \end{cases} \quad (11)$$

Equação 12. Modelo exponencial

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[1 - e^{-3h/a} \right], h < d \quad (12)$$

onde d é a máxima distância na qual o semivariograma é definido

Equação 13. Modelo gaussiano

$$\gamma(h) = C_0 + C \cdot \left[1 - e^{-3(h/a)^2} \right], h < d \quad (13)$$

onde d é a máxima distância em que o semivariograma é definido

b) Modelos sem patamar:

b1) Modelo potencial

Um modelo potencial é caracterizado pela ausência de patamar e, de acordo com Journel e Huijbregts (1978), Guerra (1988), Valente (1989), Andriotti (2004), Guimarães (2004) e Soares (2006) a equação do modelo potencial é dada pela relação a seguir:

Equação 14. Modelo potencial

$$\gamma(h) = C_0 + w \cdot h^t, \quad 0 < t < 2 \quad (14)$$

onde w = inclinação da reta tangente junto à origem. Na relação (14), quando t=1, tem-se o modelo linear.

Para o cálculo de $\gamma(h)$ não existe uma regra que estabeleça a quantidade mínima de amostras a serem utilizadas, mas existe recomendação para que se utilize pelo menos 30 pontos amostrais (LANDIM, 2003).

O semivariograma com melhor ajuste é aquele que possui o melhor ajuste de dados à reta de 45° (valores reais versus valores estimados) obtido pela validação cruzada (VIEIRA, 1995). A validação cruzada é o procedimento mediante o qual cada amostra é retirada do conjunto de dados e é feita uma krigagem para estimar seu valor; o valor médio das diferenças será tão mais próximo de zero quanto melhor for à estimativa.

A validação cruzada pode ser utilizada para avaliar se o modelo de semivariograma escolhido está bem ajustado aos dados disponíveis. Observando-se que este procedimento não prova que o modelo de semivariograma esteja correto, tão somente prova que ele não é inteiramente incorreto (LANDIM, 2003; ANDRIOTTI, 2004). O teste de validação cruzada pode

ser realizado com auxílio dos softwares GS⁺ versão 9 (ROBERTSON, 2008) e Surfer versão 8 (GOLDEN SOFTWARE, 2002).

Existem vários critérios/métodos utilizados para verificar a qualidade do ajuste do semivariograma aos dados experimentais, como por exemplo: critério de Filliben (FILLIBEN, 1975), critério de informação de Akaike (MACBRATNEY e WEBSTER, 1986), método da indicação da qualidade do ajuste – IGF (PANNATIER, 1996) e método dos mínimos quadrados - MMQ (BUSSAB e MORETTIN, 2002). O método dos mínimos quadrados MQO (ou mínimos quadrados ordinários) ou OLS do inglês (*ordinary least squares*), segundo Bussab e Morettin (2002), consiste em obter os valores dos parâmetros de um modelo que minimiza a soma do quadrado da diferença entre os valores observados e os estimados.

Na existência de dependência espacial, as estimativas dos pontos não observados podem ser obtidas pela técnica de krigagem ordinária.

Seja um ponto que se deseja estimar, sendo o valor real desconhecido representado por Z . De acordo com Journel e Huijbregts (1978) e Isaaks e Srivastava (1989), o valor estimado por krigagem (Z_k^*) é calculado com o uso de n amostras vizinhas localizadas, segundo coordenadas conhecidas, com valores $Z(x_1)$, $Z(x_2)$, $Z(x_3)$, ..., $Z(x_n)$, conforme combinação linear:

Equação 15. Estimativa de um ponto por krigagem

$$Z_k^* = \lambda_1 Z(x_1) + \lambda_2 Z(x_2) + \dots + \lambda_n Z(x_n) \quad (15)$$

onde Z_k^* é o estimador de krigagem, λ_i são os ponderadores (pesos atribuídos) a cada amostra i , $Z(x_i)$ são os dados experimentais e n é o número de amostras.

O estimador de krigagem Z_k^* deve ser um estimador não enviesado, porque pretende que a média dos erros seja igual a zero - $E[\varepsilon(x_0) = Z(x_0) - Z_k^*(x_0)] = 0$, sendo $\varepsilon(x_0)$ o erro de

estimação; isso significa que: $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$. Além disso, a variação de estimação deve ser mínima, isto

é: $\sigma_k^2 = \text{Var}\{Z(x_0) - Z_k^*(x_0)\} = E\left[(Z - Z_k^*)^2\right]$ é mínima.

No processo de estimativa de um ponto utilizando o método de krigagem, no qual se deve minimizar a estimativa da variância - $\sigma_k^2(Z - Z_k^*)$ sujeito a condição $\sum_{i=1}^n (\lambda_i) = 1$; aplica-se o Método dos Multiplicadores de Lagrange. Assim, para a estimativa de um ponto X_0 deve-se resolver o seguinte sistema:

Equação 16. Sistema para a estimativa de um ponto

$$\begin{bmatrix} \bar{\gamma}(x_1, x_1) & \bar{\gamma}(x_1, x_2) & \cdots & \bar{\gamma}(x_1, x_n) & 1 \\ \bar{\gamma}(x_2, x_1) & \bar{\gamma}(x_2, x_2) & \cdots & \bar{\gamma}(x_2, x_n) & 1 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ \bar{\gamma}(x_n, x_1) & \bar{\gamma}(x_n, x_2) & \cdots & \bar{\gamma}(x_n, x_n) & 1 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\gamma}(x_1, x_0) \\ \bar{\gamma}(x_2, x_0) \\ \vdots \\ \bar{\gamma}(x_n, x_0) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$[x_i, x_i] \cdot [\lambda_i] = [x_i, x_0]$$

A matriz $[x_i, x_i]$ contém os valores obtidos no semivariograma referentes às distâncias entre as amostras estimadoras; o vetor $[x_i, x_0]$ contém os valores obtidos no semivariograma referentes às distâncias entre cada amostra e o ponto (X_0) a ser estimado e, o vetor $[\lambda_i]$ contém os ponderadores a serem calculados.

Resolvido o sistema de equações obtêm-se os pesos λ_i e o multiplicador de Lagrange μ , segundo a relação $[\lambda_i] = [x_i, x_i]^{-1} \cdot [x_i, x_0]$.

Com os pontos vizinhos e respectivos pesos, obtêm-se uma combinação linear para X_0 :

Equação 17. Combinação linear

$$X_0 = \sum \lambda_i \cdot X_i \quad (17)$$

O valor da variância (σ^2) associada ao valor X_0 obtido por estimativa é obtido pela expressão:

Equação 18. Variância associada a um valor estimado

$$\sigma_k^2 = \sum \lambda_i \bar{\gamma}(x_i, x_0) + \mu = [\lambda_i]^t \cdot [x_i, x_0] \quad (18)$$

onde $[\lambda_i]^t$ é o vetor transposto com os pesos λ_i e $[x_i, x_0]$ é o vetor com os valores obtidos no semivariograma referente às distâncias entre cada amostra e o ponto (x_0) a ser amostrado.

Além do estimador por krigagem ordinária existem outros estimadores por krigagem, como por exemplo, krigagem universal, krigagem indicativa e cokrigagem, facilmente encontrados na literatura (JOURNEL e HUIJBREGTS, 1978; ISAACS e SRIVASTAVA, 1989; CALVETE e RAMÍREZ, 1990; LANDIM, 2003). No caso deste trabalho foram utilizados o estimador de krigagem ordinária.

2.4.1. Estudos anteriores

Sobre os parâmetros de águas subterrâneas na área urbana de Porto Velho já existem trabalhos que fizeram aplicação desta metodologia na área de hidrogeologia (LIMA et al., 2008; RODRIGUES, 2008). Também existem trabalhos focados na avaliação do potencial hidrogeológico e em estudos que envolvem parâmetros utilizados para definir os índices de qualidade de águas subterrâneas (CAMPOS, 1998; CAMPOS e DREWS, 1999a, 199b; CAMPOS et al, 2004; ZUFFO et al., 2009); mas não é comum a existência de trabalhos focados na aplicação da metodologia geoestatística envolvendo índice de qualidade para a elaboração de um diagnóstico sobre as águas subterrâneas de Porto Velho.

A aplicação de métodos geoestatísticos para mapeamento de área de risco em saúde pública no município de Porto Velho - RO foi realizada por Lima et al. (2008), com base em teores de nitrato (NO_3) resultantes da coleta de amostras em 90 poços amazonas, distribuídos em 13 bairros da cidade de Porto Velho. Os pesquisadores puderam observar que 33% das amostras apresentaram teores acima de 10 mg/L (limite máximo permitido na Portaria 2.914/2011 do Ministério da Saúde). Segundo conclusão dos autores fica explícito, que os problemas

encontrados na área pesquisada, representam a forma sob a qual o problema social se expressa, confirmada pela observação de que fontes potenciais de contaminação das águas estão relacionadas tanto com a deficiência de infraestrutura urbana quanto às políticas públicas, incapazes de eliminar estas fontes de contaminação, tendo em vista que a população de Porto Velho não ultrapassava 400 000 habitantes até 2008.

No trabalho de Rodrigues (2008) foi realizada uma avaliação espacial da qualidade da água subterrânea na área urbana de Porto Velho, com informações de parâmetros bacteriológicos e físico-químicos da qualidade da água, a partir da coleta de amostras em 166 poços amazonas. Neste é detectado a contribuição de técnicas geoestatística para a confecção de mapas de risco sob os parâmetros estudados. Segundo o pesquisador, os níveis bacteriológicos elevados estão diretamente ligados às fossas e sumidouros, construídos sem critérios de segurança. As contribuições fluviais de lançamentos de resíduos domésticos e sólidos direcionados a córregos, valas e igarapés, possibilitam a influência como agentes poluidores nas proximidades dos poços onde se localizam. O autor concluiu que, em função das instalações das Usinas Hidrelétricas de Santo Antônio e Jirau, no rio Madeira, o adensamento populacional crescerá de forma acentuada, e se não for implantada uma política de infraestrutura adequada de saneamento básico na cidade, os índices de doenças vinculadas à água crescerão de forma geométrica.

Campos et al. (2004) realizaram pesquisa sobre a contaminação do aquífero Jaciparaná, na cidade de Porto Velho. O estudo foi realizado com os valores de condutividade elétrica, nitrato e cloro de amostras coletadas em 30 poços tubulares distribuídos nos bairros São João Bosco e Liberdade. Neste trabalho foi possível identificar o processo de contaminação pela ausência de esgotamento sanitário e, assim, de efluentes domésticos, embora exista uma camada argilosa com espessura aproximada de 10 metros, que diminui a drenagem vertical das águas superficiais e, conseqüentemente, a vulnerabilidade natural do aquífero, na situação em que a densidade populacional e as características das fossas domésticas contribuem para aumentar o risco de contaminação. Na concepção destes pesquisadores, somente com a construção de um sistema de saneamento básico eficaz, com a ampliação da rede de coleta e tratamento de esgoto e de distribuição de água potável, haverá a diminuição do risco para a população contrair doenças causadas pela ingestão da água de má qualidade.

Preocupados com a gestão da qualidade das águas subterrâneas de Rondônia, Zuffo et al (2009) estudaram os parâmetros físico-químicos e bacteriológicos de 384 pontos amostrados, ambos constituintes da base de dados do 2º Zoneamento Sócio-Econômico-Ecológico do Estado de Rondônia – ZSEE-RO. O estudo demonstrou que as águas subterrâneas analisadas possuíam boa qualidade físico-organoléptica, mas de um modo geral, as águas estudadas apresentaram resultados que excederam os padrões bacteriológicos de potabilidade, necessitando de tratamento por cloração ou fervura e prévia filtração para consumo humano. As amostras da base de dados do ZSEE-RO dispostas por localidades foram reanalisadas por bacias hidrográficas, o que permitiu a obtenção de resultados importantes, como por exemplo, a bacia do rio Madeira (o rio Madeira banha a cidade de Porto Velho) foi uma das que apresentou maiores alterações, particularmente nos teores de pH, cloreto e nitrato, caracterizando perda de qualidade dos recursos hídricos subterrâneos, tendo em vista que a mesma possui o maior adensamento populacional de Rondônia e não foram adotadas medidas satisfatórias para utilização racional dos referido recursos.

Oliveira et al. (2007) realizaram o mapeamento dos aquíferos do Estado da Bahia utilizando o índice de qualidade natural das águas subterrâneas – IQNAS, com base nos teores de cloreto, pH, sólidos totais, dureza, nitrato e flúor, das águas de 1899 poços cadastrados na base de dados da Companhia de Engenharia Rural da Bahia – CERB, além de dados de 5 amostras de águas minerais tomadas como padrão, da bacia sedimentar do Recôncavo-Tucano. Na consolidação das informações do IQNAS, os autores utilizaram geoestatística para confeccionar mapas da qualidade das águas estudadas. Para os pesquisadores, os valores do IQNAS encontrados quantificaram e qualificaram as águas subterrâneas dos principais domínios hidrogeológicos ou aquíferos do Estado da Bahia, confirmando, positivamente, a metodologia adotada.

Para estudar a qualidade da água subterrânea para irrigação na bacia hidrográfica do rio Piauí, em Sergipe, Amorim et al. (2010) utilizaram técnica geoestatística na confecção de mapas de risco com dados de 278 poços, para as variáveis indicadoras de qualidade da água, que possibilitaram a visualização do comportamento espacial das águas da bacia. Nesse trabalho, os autores verificaram que as águas subterrâneas apresentaram boas condições para uso na irrigação, principalmente na porção centro-litorânea da bacia, visto que houve tendência na concentração de

sais das águas no sentido centro-cabeceiras. Os autores também concluíram que a aplicação adequada do conhecimento em geoestatística, permitiu a identificação da influência da distribuição das formações aquíferas na qualidade das águas subterrâneas dos poços tubulares na bacia.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Sobre o aquífero Jaciparaná, ocupado parcialmente pela área urbana de Porto Velho, ainda não existe senso comum sobre a quantidade mínima de amostras e locais de amostragem de águas subterrâneas, cujos resultados das análises laboratoriais sejam suficientes para representarem a qualidade das águas subterrâneas deste aquífero; além disso, no início da ocupação e uso dos solos de Porto Velho foi disseminada a cultura de construção de poços amazônicos e não existe registro com a precisão da quantidade e dos locais desses poços distribuídos na cidade. Diante deste contexto, foram coletas 141 amostras distribuídas com distâncias em torno de 800 metros sobre uma área de aproximadamente 80% do perímetro urbano de Porto Velho.

As metodologias de coleta e preservação das amostras, para análise em laboratório seguiram a descrição de Brandão et al. (2011) e, as análises laboratoriais foram realizadas conforme as descrições da Associação Americana de Saúde Pública (APHA, 1990).

Com relação aos procedimentos para coletar, preservar e determinar os teores dos parâmetros que foram estudados, os quadros 1 e 2 contêm uma síntese dessas informações.

Parâmetro	Frasco	Volume (ml)	Preservação	Prazo	Observações
Coliformes totais					
Turbidez	P, V	200	Refrigerar a 4°C	24 horas	Evitar exposição à luminosidade
pH	P, V	200	Refrigerar a 4°C	6 horas	Medida em campo com potenciômetro
Cloreto	P, V	200	Não há	14 dias	
Dureza	P, V	200	Refrigerar a 4°C	7 dias	
Fluoreto	P	100	Refrigerar a 4°C	7 dias	
Ferro	P, V	300	*	MBP	* Adicionar 2ml HCl conc./cada 100ml de amostra
Manganês					
Nitrogênio amoniacal	P, V	1000	Refrigerar a 4°C	24 horas	Adicionar H ₂ SO ₄ até pH < 2
Nitrogênio Nitrato	P, V	200	Refrigerar a 4°C	24 horas	Adicionar H ₂ SO ₄ até pH < 2
Sulfato	P, V	200	Refrigerar a 4°C	7 dias	Processar o mais rápido amostras com matéria orgânica
P = plástico, V = vidro neutro ou borossilicato, MBP = o mais breve possível,					

Quadro 1. Coleta e preservação de amostras para análise físico-química

Fonte: Adaptado de Santos (apud FEITOSA et al., 2008)

Parâmetro	Determinação	Referência
Coliformes totais	Técnica de tubos múltiplos	L5. 202 (CETESB, 1993a)
Turbidez	Método nefelométrico	L5. 156 (CETESB, 1978a)
Cloreto	Método do nitrato mércurio	L5. 113 (CETESB, 1993b)
Dureza	Método titulométrico do EDTA	L5. 124 (CETESB, 1992)
Fluoreto	Método do eletrodo de íon seletivo	L5. 400 (CETESB, 1987)
Ferro	Método colorimétrico-automático com orto-fenantrolina	L5. 184 (CETESB, 1991)
Manganês	Espectrofotometria de absorção atômica	Skoog et al. (2006)
Nitrogênio amoniacal	Método de nesslerização com destilação prévia	L5. 136 (CETESB, 1978c)
Nitrogênio nitrato	Método de ácido fenoldissulfônico	L5. 137 (CETESB, 1978b)
Sulfato	Gravimétrico	Baccan et al., 1979

Quadro 2. Métodos para determinação dos parâmetros

Fonte: Adaptado de Santos (apud FEITOSA et al., 2008)

Os resultados numéricos das análises laboratoriais foram tabulados em planilhas eletrônicas do Microsoft Office Excel 2007. Após a tabulação, com a utilização das relações (2) a (8) adaptadas dos procedimentos de Almeida (2007), os cálculos do índice de qualidade de água subterrânea - IQAS foram realizados e este índice foi dividido em quatro classes: ruim ($0 \leq \text{IQAS} \leq 50$), médio ($50 < \text{IQAS} \leq 70$), bom ($70 < \text{IQAS} \leq 90$) e excelente ($90 < \text{IQAS} \leq 100$). Com esta classificação, os teores dos parâmetros também foram organizados por unidade estratigráfica.

Em função da baixa quantidade de poços com o enquadramento de IQAS na classe médio ou ruim, os IQAS dos poços foram aglutinados em dois grupos: A (com IQAS de classe excelente ou bom) e B (com IQAS de classe médio ou ruim).

Após a formação dos grupos (A e B), nas 34 amostras constituintes do grupo B para os teores de coliformes termotolerantes, apenas 5 não tiveram presença de coliformes, por isto, foram excluídas dos cálculos variográficos; sobre o parâmetro manganês, das 34 amostras analisadas, 22 ficaram com teor de manganês igual a zero e foram eliminadas dos cálculos variográficos; de forma similar, os cálculos variográficos não foram realizados para o teor de

amônia, pois em 12 amostras o teor de amônia foi igual a zero. Portanto, os cálculos variográficos foram realizados nos grupos A e B, para os teores dos parâmetros de ferro, cloreto, dureza, fluoreto, pH, sulfato, turbidez e nitrato.

Com os dados experimentais foram realizadas as análises variográficas para ajustes de semivariogramas teóricos, para verificar a existência de dependência espacial. Para verificar que o modelo de semivariograma ajustado aos dados experimentais não estariam inteiramente incorreto, foi aplicado o teste de validação cruzada (LANDIM, 2003; ANDRIOTTI, 2004).

Na existência de dependência espacial, as estimativas dos pontos não observados foram obtidas pelo interpolador krigagem ordinária, a partir das quais foram gerados mapas que receberam as devidas interpretações associadas à realidade de campo.

Os ajustes dos semivariogramas e confecção de mapa, dos dados referentes aos teores dos parâmetros estudados, foram realizados com a utilização dos softwares GS⁺ versão 9 (ROBERTSON, 2008) e Surfer versão 8 (GOLDEN SOFTWARE, 2002).

4. RESULTADOS

Os 141 pontos amostrados de águas subterrâneas no perímetro urbano de Porto Velho (RO) com malha aleatória e georreferenciada estão dispostos na figura 4.

Com a aplicação das relações (2) a (8) foram calculados os índices de qualidade de água subterrânea dos teores dos parâmetros estudados sobre as amostras de 141 poços e, conforme critério de classificação estabelecido, 13 poços foram enquadrados na classe de IQAS Excelente, 94 poços na classe de IQAS Bom, 5 poços na classe de IQAS Médio e 29 poços na classe de IQAS Ruim. Estas informações estão disponíveis na tabela 1.

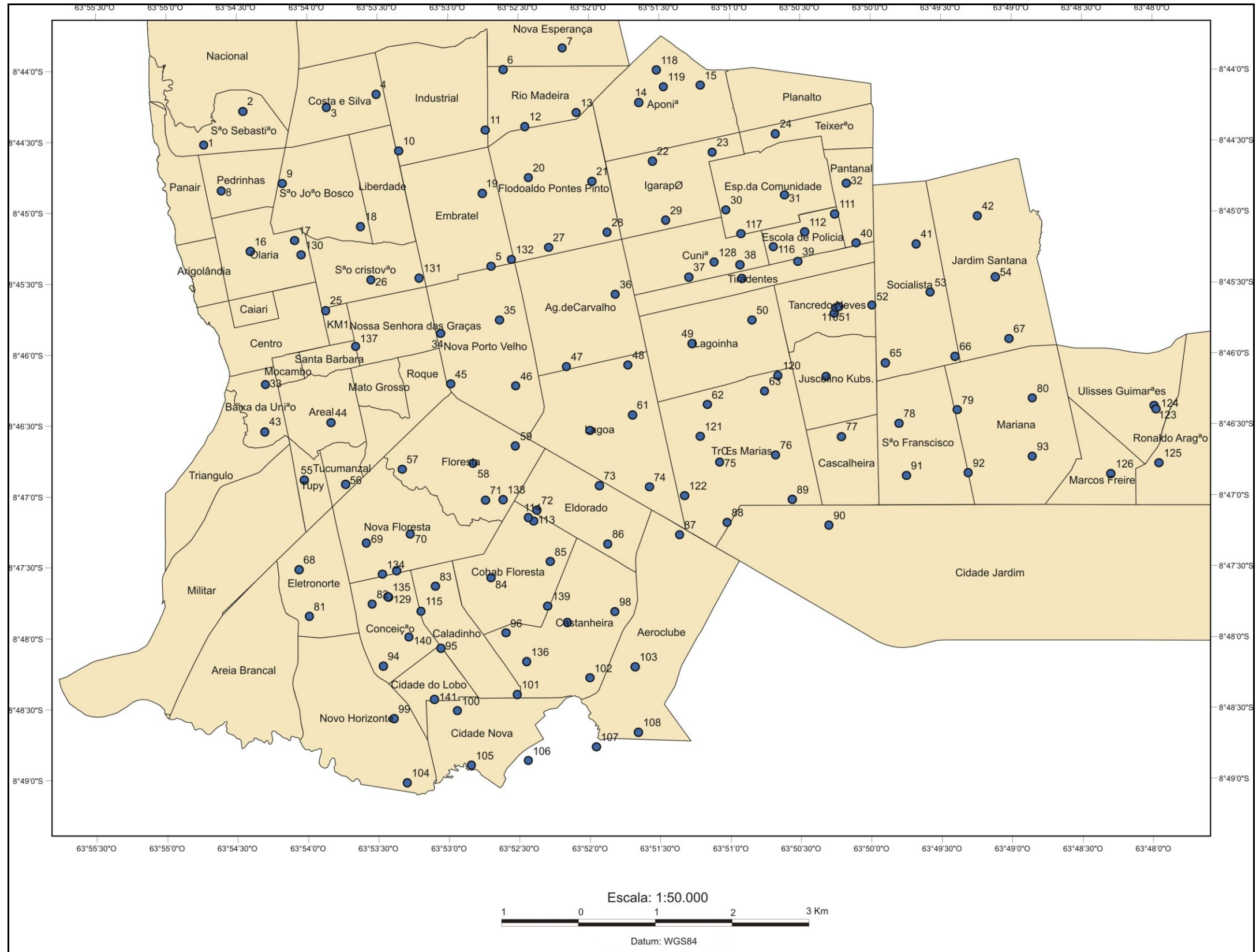


Figura 4. Área de coleta das amostras
Fonte: Adaptado de Sempla (2007)

Tabela 1. Classes de IQAS dos parâmetros estudados por poço

Poço	UTM E	UTM N	CT	Ferro (mg/L)	Manganês (mg/L)	Cloreto (mg/L)	Dureza (mg/L)	Fluoreto (mg/L)	pH	Sulfato (mg/L)	Turbidez (uT)	Nitrato (mg/L)	Amônia (mg/L)	IQAS	Classe
1	399663,902	9033549,434	1	0,08	0	22,99	12,7	0,19	4,86	0,44	0,35	8,32	0,41	0,00	Ruim
2	400174,154	9033985,425	1	0,02	0	30,9	25,1	0	5,26	0	1,22	8,05	0,84	0,00	Ruim
3	401263,525	9034038,12	0	0,01	0,04	14,99	4,2	0,47	4,4	0,87	15,9	4,64	0	79,15	Bom
4	401908,199	9034206,609	0	0	0	7,99	13,2	0,2	5,65	9,13	0,72	3,01	0	91,64	Excelente
5	403404,089	9031974,418	1	0,1	0,01	7,99	47	0,09	5,9	12,82	44,5	0,53	0,15	0,00	Ruim
6	403560,175	9034529,141	0	0,02	0	18,99	3,7	0,07	5,56	16,79	3,71	3,85	0,02	85,99	Bom
7	404333,643	9034809,01	1	0,01	0	9,99	2,6	0,13	4,76	0,53	2,18	5,8	0,01	0,00	Ruim
8	399894,814	9032952,362	1	0,01	0	11,99	19,2	0,01	5,04	17,09	0,73	4,25	0,33	0,00	Ruim
9	400686,053	9033049,356	0	0,01	0,02	9,99	6,2	0,09	5,19	0,43	2,78	1,68	0	92,52	Excelente
10	402200,347	9033472,014	0	0,06	0	5,99	15,2	0,1	5,58	7,99	9,26	1,85	0	89,34	Bom
11	403329,45	9033744,45	0	0,06	0	9,99	46,4	0,14	5,74	27,03	31,3	0,3	1,49	83,15	Bom
12	403843,173	9033790,425	0	0,01	0	16,99	25,3	0,1	6,01	10,97	19	8,9	0	77,02	Bom
13	404514,774	9033970,213	0	0,01	0	4,99	0	0,14	4,68	2,09	0,8	2,52	0	87,15	Bom
14	405325,539	9034100,773	1	0,01	0	17,99	6,3	0,05	5,34	4,33	14,02	10,67	0,03	0,00	Ruim
15	406126,961	9034326,826	1	0,01	0,01	13,99	8,3	0,06	5,09	5,72	0,89	18,19	0,08	0,00	Ruim
16	400271,378	9032165,904	0	0,01	0	48,98	25,2	0,18	5,85	43,77	2,76	10,76	0	78,23	Bom
17	400847,222	9032307,931	0	0,05	0	19,99	9,6	0	5,82	20,96	2,65	0,84	0,06	93,23	Excelente
18	401704,689	9032489,651	0	0,08	0	19,99	19,2	0,15	6,09	24,51	16,9	4,91	0,13	81,26	Bom
19	403292,32	9032920,626	0	0,01	0	59,9	24,6	0,14	5,37	4,73	0,82	19,92	0,26	75,07	Bom
20	403890,697	9033125,133	0	0,01	0	22,9	23,1	0,03	4,92	4,32	0,85	19,74	0,03	71,98	Bom
21	404716,038	9033079,937	1	0,01	0	18,99	13,3	0,08	5,75	19,29	3,32	1,77	0,01	0,00	Ruim
22	405505,914	9033342,576	0	0,14	0	20,99	102,7	0,18	6,69	10,8	6,06	0,7	0,25	88,08	Bom
23	406286,023	9033452,814	1	0,01	0,08	10,99	6,1	0	5,6	8,7	49	4,64	0,16	0,00	Ruim
24	407105,221	9033694,147	1	0,01	0,02	21,99	5,6	0,05	4,9	1,89	0,94	16,73	0,02	0,00	Ruim
25	401254,858	9031397,703	0	0,01	0	6,99	25,2	0	5,97	7,2	29,7	2,87	0	83,88	Bom

26	401841,304	9031796,595	0	0,01	0	6,99	22	0,16	6,89	2,42	13,2	2,83	0	86,64	Bom
27	404155,916	9032220,19	0	0,41	0	23,99	27,6	0,07	5,51	25,81	3,29	1,54	0,01	88,71	Bom
28	404917,985	9032416,437	1	0,01	0	5,99	9,5	0,09	5,36	9,2	2,19	5,18	0	0,00	Ruim
29	405677,51	9032572,859	1	0,1	0,01	5,99	34,6	0,08	6,23	3,72	7,58	1,32	0,01	0,00	Ruim
30	406462,288	9032703,45	0	0,1	0,01	12,99	5,1	0,13	5,28	2,53	3,17	3,98	0	86,44	Bom
31	407225,251	9032900,318	0	0,4	0	20,99	0	0,53	4,82	1,73	0,87	10,58	0,02	76,97	Bom
32	408030,448	9033053,37	0	0,03	0,05	26,99	0	0,42	4,59	1,06	6,16	8,19	0,02	76,47	Bom
33	400470,68	9030436,963	0	0,01	0	12,99	23,2	0,01	5,83	13,2	0,98	5,93	0	84,24	Bom
34	402748,785	9031100,715	0	0,01	0	15,99	21,2	0,01	5,87	1,09	1,93	4,56	0	85,11	Bom
35	403513,304	9031273,224	0	0,01	0	17,99	9,8	0,13	5,62	1,5	1,73	13,63	0,26	77,65	Bom
36	405022,357	9031609,196	0	0,01	0	17,99	12,4	0,15	5,07	0	0,35	15,58	0	76,04	Bom
37	405977,956	9031831,188	0	0,01	0,02	5,99	5,7	0,1	5,61	0,81	15,7	0	0	90,24	Excelente
38	406646,046	9031995,235	1	0,01	0,03	14,99	48,3	0,01	6,22	14,3	8,55	5,75	0,02	0,00	Ruim
39	407399,664	9032036,732	1	0,01	0,01	9,99	6,7	0,02	4,81	0,9	1,43	6,02	0	0,00	Ruim
40	408154,492	9032276,576	0	0,03	0,04	19,99	23,6	0,4	4,66	10,94	6,28	11,02	0	74,02	Bom
41	408937,379	9032265,59	0	0,04	0	12,99	12,8	0,33	5,04	2,14	7,6	1,54	0	88,15	Bom
42	409736,273	9032631,105	0	0,03	0,01	25,99	16,1	0,63	4,5	3,07	17,9	4,95	0	79,35	Bom
43	400461,708	9029823,39	0	0,07	0	17,99	15,6	0	5,03	28,04	4,3	3,63	0,02	80,08	Bom
44	401321,695	9029940,999	0	0,01	0	10,99	34,4	0	5,62	4,26	0,4	20,41	0	76,92	Bom
45	402877,929	9030442,137	0	0,01	0	10,99	19,8	0,06	6,45	10,26	32,1	4,07	0,01	81,70	Bom
46	403728,693	9030416,817	0	0,11	0	8,99	46,8	0	5,82	17,33	9,34	1,01	0	89,03	Bom
47	404387,418	9030670,554	0	0,09	0	19,99	7,5	0,06	5,42	2,72	69,6	9,87	0	75,27	Bom
48	405187,811	9030690,309	0	0,02	0	17,99	116,7	0,32	7,02	11,18	12,8	0,88	0,58	87,05	Bom
49	406021,167	9030967,748	0	0,01	0,01	7,99	9,4	0,06	5,16	6,29	3,12	7,57	0	81,49	Bom
50	406802,218	9031274,463	1	0,02	0,07	7,99	58,9	0,09	6,72	14,67	43,4	0,22	0,07	0,00	Ruim
51	407872,292	9031361,002	0	0,01	0	28,99	35,8	0	5,67	2,23	0,64	20,59	0	76,16	Bom
52	408362,09	9031468,013	1	0,1	0	27,99	23,5	0,48	5,33	1,13	3,49	6,06	0	0,00	Ruim
53	409120,257	9031636,864	0	0,01	0	10,99	0	0,34	4,69	0	0,97	2,21	0	89,19	Bom
54	409970,097	9031837,742	0	0,02	0	11,99	0	0,32	4,98	1,07	3,47	1,85	0	88,35	Bom
55	400974,798	9029195,924	0	0,01	0	7,99	0	0,03	5,23	1,37	0,56	0	0	95,95	Excelente
56	401512,027	9029139,603	0	0,25	0	7,99	57,2	0	6,78	15,28	48,3	3,05	0	80,41	Bom

57	402250,273	9029335,297	0	0,01	0	19,99	11,66	0	5,3	0,72	1,83	22	0,24	73,77	Bom
58	403171,175	9029410,885	0	0,11	0,03	30,99	8,5	0,01	7,8	8,11	20,8	1,81	0	88,89	Bom
59	403724,455	9029639,398	0	0,02	0	19,99	12,1	0,09	5,91	0	2,63	7,92	0,01	81,36	Bom
60	404692,593	9029839,34	0	0,03	0	13,99	0	0,04	5,4	15,79	9,2	3,14	0	85,95	Bom
61	405244,842	9030043,394	1	0,51	0,01	4,99	38,2	0,07	6,82	3,46	11,4	0,3	1,56	0,00	Ruim
62	406218,757	9030175,644	0	0,41	0,02	9,99	34,4	0,11	5,98	10,98	17,2	1,37	0,19	85,56	Bom
63	406964,89	9030351,365	0	0,31	0	24,99	19,4	0,16	5,45	24,7	4,39	12,44	0,07	75,89	Bom
64	407767,316	9030540,134	1	0,08	0,01	20,99	97,4	0,08	6,28	26,72	2,89	1,41	3,01	0,00	Ruim
65	408536,327	9030721,073	1	0,11	0	28,99	3,7	0,06	4,68	0	2,39	5,8	0	0,00	Ruim
66	409444,924	9030803,124	1	0,04	0	18,99	2,8	0,05	4,93	0	0,26	5,8	0	0,00	Ruim
67	410146,52	9031033,197	0	0,01	0	8,99	2,3	0,24	4,1	0,29	1,77	3,67	0	83,91	Bom
68	400906,981	9028031,241	0	0,02	0,07	6,99	0	0,01	4,9	0,69	1,39	0,61	0	87,20	Bom
69	401784,975	9028376,882	0	0,08	0,02	16,99	4,4	0	5,64	3,19	7	6,37	0,01	81,52	Bom
70	402356,649	9028493,01	0	0,13	0	8,99	0	0,04	7,56	7,63	18	6,37	0	80,53	Bom
71	403331,013	9028933,159	0	0,02	0	11,99	14,2	0	5,78	3,33	22,06	9,52	0	76,84	Bom
72	404002,37	9028804,587	0	0,01	0	21,99	24,1	0,1	6,4	0	2,1	13,94	0	77,44	Bom
73	404815,125	9029124,244	0	0,01	0	8,99	2,7	0	5,28	2,78	1,12	0,7	0,01	94,72	Excelente
74	405466,651	9029104,07	0	0,01	0,01	3,99	7,8	0,07	4,71	0,32	2,15	3,76	0	81,96	Bom
75	406382,255	9029427,247	0	0,01	0	4,99	6,8	0,04	5,55	364	18,7	2,21	0	81,47	Bom
76	407110,187	9029522,432	0	0,01	0	9,99	6,8	0	5,75	0,13	2,74	2,87	0	88,65	Bom
77	407964,407	9029759,081	1	0,2	0	34,98	13,6	0,07	5,4	3,8	8,59	1,1	0	0,00	Ruim
78	408714,059	9029933,451	1	0,05	0	23,99	31,5	0,41	5,71	3,81	1,55	6,86	0	0,00	Ruim
79	409473,725	9030108,382	0	0,08	0	29,99	13,8	0,1	4,65	1,11	1,5	8,59	0	76,70	Bom
80	410450,461	9030260,771	0	0,01	0	12,99	0	0,35	4,38	0	0,78	3,58	0	86,02	Bom
81	401043,506	9027424,32	0	0,02	0	24,99	20,6	0	5,71	2,8	0,69	11,11	0,29	78,81	Bom
82	401859,026	9027579,742	0	0,02	0	25,99	22,8	0,05	6,01	3,2	2,05	9,65	0	79,86	Bom
83	402682,176	9027813,337	0	0,01	0	20,99	14,6	0,1	5,87	11,2	2,73	9,82	0	79,69	Bom
84	403406,299	9027925,056	0	0	0	11,99	24,8	0,07	6,76	0,31	0,67	5	0	86,17	Bom
85	404177,052	9028134,614	0	1,42	0,43	11,99	19,5	0	7,2	61,66	286	3,95	0,03	69,37	Médio
86	404924,444	9028365,995	0	0,01	0	17,99	16	0,03	5,43	0	1,16	13,85	1,85	74,20	Bom
87	405861,945	9028483,69	0	0,04	0,02	5,99	25	0,11	5,82	9,9	34,5	0,17	0,03	88,47	Bom

88	406477,628	9028646,299	0	0,01	0	15,99	11	0,08	5,75	55,49	9,12	3,94	0	82,23	Bom
89	407327,287	9028945,092	1	0,26	0	12,99	21,7	0,23	5,73	11,44	34,9	1,59	0,14	0,00	Ruim
90	407805,067	9028608,709	1	0,07	0	9,99	8,3	0,07	6,92	0,81	2,94	1,63	0	0,00	Ruim
91	408811,909	9029255,888	1	0,09	0	9,99	0	0,02	4,85	0,52	7,21	1,1	0	0,00	Ruim
92	409615,092	9029292,262	1	0,09	0	20,99	4	0,12	4,85	2,5	7,23	1,94	0	0,00	Ruim
93	410452,099	9029505,159	0	0,01	0	5,99	0	0,07	4,95	0	1,65	1,23	0	88,66	Bom
94	402004,905	9026779,234	0	0,01	0	15,99	42,6	0	6,5	2,65	1,85	10,31	0	79,04	Bom
95	402751,604	9027010,546	0	0,01	0	41,98	7	0,02	5,05	10,2	15,6	16	0	70,10	Bom
96	403597,595	9027208,796	0	0,05	0	36,98	0	0,03	5,16	2,28	3,93	9,12	0	79,89	Bom
97	404400,509	9027346,556	0	0,05	0	13,99	0	0,06	5,53	2,49	9,51	3,98	0	84,25	Bom
98	405017,544	9027485,863	1	1,1	0	18,99	28,6	0	6,48	51,66	532	2,78	0,26	0,00	Ruim
99	402144,349	9026093,371	0	0,01	0	8,99	49,2	0,07	6,25	0,71	1,11	12,9	0	78,14	Bom
100	402967,779	9026195,498	0	0,01	0	42,98	14,6	0,04	5,49	0	1,04	28,07	0	74,31	Bom
101	403746,516	9026409,84	0	0,61	0	48,98	22,8	0	6,03	32,17	10,6	1,54	0	86,02	Bom
102	404690,9	9026622,672	0	0,01	0	29,99	17,4	0,16	4,95	2,14	1,29	15,85	0,36	71,96	Bom
103	405278,982	9026769,095	0	0,01	0	30,99	13,8	0	4,95	0	0,59	16,2	0,02	74,11	Bom
104	402315,48	9025261,632	0	0,01	0	7,99	0	0	5,73	2,61	1,25	0	0	94,64	Excelente
105	403149,376	9025489,499	0	0,02	0	20,99	24,6	0	5,94	7,6	2,64	7,57	0	81,01	Bom
106	403891,401	9025547,298	0	0,05	0	5,99	2,2	0,2	5,67	7,62	2,36	0	0	95,04	Excelente
107	404776,119	9025727,815	0	0,01	0	7,99	39,5	0,1	5,88	2,11	3,61	0,57	0	91,26	Excelente
108	405324,274	9025917,932	1	0,04	0	7,99	22,6	0,02	5,79	5,19	13,7	3,54	0,01	0,00	Ruim
109	407893,134	9031436,234	0	0,01	0	4,99	0	0,01	5,35	22,76	0,92	0	0,02	94,79	Excelente
110	407931,608	9031447,377	0	0,01	0	12,99	11	0,1	5,35	0,37	0,37	5,35	0,04	87,15	Bom
111	407877,221	9032655,76	0	0,01	0	5,99	32	0	5,22	0	0,93	3,76	0	87,09	Bom
112	407486,145	9032420,485	0	0,04	0	18,99	0	0,12	6,64	1,05	0,44	6,86	0,2	84,82	Bom
113	403959,478	9028660,858	0	0,08	0	26,99	10,8	0,02	4,5	2,52	0,74	16,42	0,01	73,83	Bom
114	403893,371	9028709,354	0	0,04	0	16,99	18,2	0,09	4,62	2,07	1,46	13,01	0,03	73,91	Bom
115	402494,971	9027489,81	0	0,01	0	37,98	42	0,05	4,31	2,49	0,55	28,51	0,01	69,76	Médio
116	407078,48	9032227,184	0	0,01	0	16,99	0	0	5,26	0	2,2	7,88	0	81,77	Bom
117	406656,804	9032395,405	0	0,01	0	17,99	18,2	0	5,41	0	8,76	4,02	0	83,66	Bom
118	405556,351	9034525,77	0	0,04	0	15,99	28	0	5,61	0	5,57	10,76	0	77,40	Bom

119	405650,353	9034307,059	0	0,01	0	13,99	18,6	0	4,75	0	2,29	13,28	0	73,17	Bom
120	407140,535	9030554,431	0	0,01	0	18,99	56	0	5,46	0	3,33	14,34	0	75,60	Bom
121	406127,086	9029760,474	0	0,01	0	19,99	51,6	0	5,95	0	3,25	9,65	0	78,34	Bom
122	405923,146	9028993,771	0	0,07	0	11,99	44	0	5,66	0	29,8	1,01	0	87,55	Bom
123	412033,905	9030163,778	0	0,01	0	18,99	5,2	0,18	4,95	0,16	0,21	8,98	0,44	78,45	Bom
124	412061,502	9030117,399	0	0,01	0	25,99	22,2	0,15	4,31	0	3,14	24,17	0	69,77	Médio
125	412099,285	9029419,803	0	0,01	0	15,99	6,1	0,09	5,58	0	3,19	10,99	0	79,06	Bom
126	411472,635	9029281,361	0	0,01	0	5,99	0	0,18	5,37	0	0,88	4,78	0	87,98	Bom
127	406670,21	9031816,059	0	0,01	0	2,99	0	0,17	5,8	0	0,4	3,23	0,01	92,24	Excelente
128	406307,837	9032027,531	0	0,01	0	13,99	0	0,1	5,1	0	0,61	1,9	0	94,19	Excelente
129	402072,189	9027670,142	0	0,01	0	13,99	17,2	0,23	6,04	1,97	1,93	8,5	0,41	80,25	Bom
130	400931,935	9032118,95	0	0,01	0	13,99	12,2	0,21	5,55	8,52	25,8	0,39	0,84	86,92	Bom
131	402467,146	9031819,635	0	0,01	0	13,99	10,2	0,16	5,02	4,7	1,51	3,98	0	83,10	Bom
132	403669,973	9032062,387	0	0,01	0	18,99	10	0,3	6,13	6,43	20,3	5,75	0	82,61	Bom
133	402178,055	9028016,475	0	0,01	0	13,49	27,2	0,13	4,17	26,14	4,58	50,34	0	64,43	Médio
134	401992,285	9027969,595	0	0,02	0	26,99	14,6	0,13	4,23	19,5	2,31	19,43	0,18	70,64	Bom
135	402063,369	9027678,966	0	0,01	0	42,98	27,4	0	4,84	15,59	13,2	13,59	0,13	69,85	Médio
136	403871,345	9026835,159	1	0,22	0,02	21,99	15	0,02	5,08	17,07	151	1,68	0,02	0,00	Ruim
137	401643,166	9030929,813	0	0,01	0	10,99	7,4	0	5,08	2,43	9,12	4,29	0,14	78,28	Bom
138	403561,755	9028941,881	0	0,01	0	1,99	4,2	0,12	4,93	7,38	1,1	2,65	0	86,09	Bom
139	404142,433	9027555,595	0	0,06	0	15,99	6,6	0,2	5,64	6,42	2,25	1,94	0	93,40	Excelente
140	402339,583	9027154,417	0	0,03	0	17,99	2,4	0,53	4,54	8,35	1,36	14,56	0	76,39	Bom
141	402669,259	9026344,724	0	0,04	0	9,99	9,2	0,32	4,97	11,81	43,1	4,02	0	79,03	Bom

pH = potencial hidrogeniônico, IQAS = índice de qualidade de água subterrânea

Na coluna CT = Coliformes Termotolerantes o valor **um** representa a presença de coliformes e o valor **zero** representa a ausência de coliformes.

Fonte: O autor

De acordo com as informações expostas na figura 2, foi possível organizar os poços amostrados por unidade estratigráfica, de tal forma que foram totalizados 49 poços na unidade estratigráfica Complexo Jamari, 82 poços amostrados na unidade Formação Jaciparaná e na unidade Lateritos Imaturos foram amostrados 10 poços. A distribuição dos 141 poços amostrados consta na tabela 2.

Tabela 2. Distribuição da quantidade de poços amostrados por unidade estratigráfica

Unidade Estratigráfica	Poços Amostrados										Total
Complexo Jamari	1	2	3	4	5	7	8	10	13	14	49
	16	17	18	20	21	22	25	26	29	33	
	34	35	36	43	44	45	46	47	48	57	
	58	59	60	61	62	71	72	73	74	75	
	76	113	121	122	130	131	133	137	138		
Formação Jaciparaná	15	23	24	30	31	32	37	38	39	40	82
	41	42	49	50	51	52	53	54	55	56	
	63	64	65	66	67	68	69	70	77	78	
	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	
	89	92	93	94	95	96	97	98	99	100	
	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	
	111	112	114	115	116	117	118	119	120	123	
	124	125	126	127	128	129	134	135	136	139	
	140	141									
Lateritos Imaturos	6	9	11	12	19	27	28	90	91	132	10

Fonte: Adaptado de Adamy e Romanini (1990)

Com base nas informações das tabelas 1 e 2 foram identificados os parâmetros com valores que não atenderam as exigências de potabilidade estabelecidas na Portaria número 2.914/2011-MS (BRASIL, 2011), em cada unidade estratigráfica. Dos 49 poços amostrados no

Complexo Jamari, 9 poços estavam com presença de coliformes termotolerantes, 40 poços apresentaram teor de pH abaixo do mínimo estabelecido na Portaria 2.914/2011-MS, 22 poços estavam com teor de turbidez acima da medida máxima que é de 5 uT e, em 10 poços foram identificados teores de nitrato acima de 10 mg/L. Na tabela 3 constam as informações de todos os parâmetros que apresentaram valores fora da faixa de potabilidade, por unidade estratigráfica.

Tabela 3. Quantidade de poços com parâmetros fora do VMP

Parâmetro	VMP	Complexo Jamari	Formação Jaciparaná	Lateritos Imaturos
CT	Ausência em 100 ml	9	17	3
Ferro (mg/L)	VMP $\leq 0,3$	2	5	1
Manganês (mg/L)	VMP $\leq 0,1$	0	1	0
Cloreto (mg/L)	VMP ≤ 250	0	0	0
Dureza (mg/L)	VMP ≤ 500	0	0	0
Fluoreto (mg/L)	VMP $\leq 1,5$	0	0	0
pH	$6 \leq \text{VMP} \leq 9,5$	40	68	7
Sulfato (mg/L)	VMP ≤ 250	1	0	0
Turbidez (uT)	VMP ≤ 5	22	27	1
Nitrato (mg/L)	VMP ≤ 10	10	24	1
Amônia (mg/L)	VMP $\leq 1,5$	1	2	0

CT = coliformes termotolerantes, VMP = valor máximo permitido para potabilidade pela Portaria 2.914/2011-MS (BRASIL, 2011).

Fonte: Adaptado de Adamy e Romanini (1990) e Brasil (2011)

A partir das informações das tabelas 1 e 2 foram identificadas as quantidades de poços com suas respectivas classificações pelo IQAS - índice de qualidade de água subterrânea para cada unidade estratigráfica. Dos 49 poços amostrados na unidade Complexo Jamari, 3 poços tiveram IQAS excelente, 36 ficaram com IQAS bom, 1 poço com IQAS médio e, 9 poços foram

classificados com IQAS ruim. Na tabela 4 constam as quantidades de poços classificados pelo IQAS para cada unidade estratigráfica deste trabalho.

Tabela 4. Quantidade de poços com a classificação do IQAS

Classes	Complexo Jamari	Formação Jaciparaná	Lateritos Imaturos	Total
Excelente	3	9	1	13
Bom	36	52	6	94
Médio	1	4	0	5
Ruim	9	17	3	29
Nº Poços	49	82	10	141

IQAS = índice de qualidade de água subterrânea
 Fonte: Adaptada de Adamy e Romanini (1990)

A partir da classificação dos IQAS constante na tabela 1, os parâmetros com as classificações Excelente e Bom foram separados para compor o grupo A, e os parâmetros enquadrados nas classes Médio e Ruim constituíram o grupo B. Assim, o grupo A ficou constituído de 107 amostras e o grupo B com 34 amostras.

Das 34 amostras que formaram o grupo B foram identificadas 29 com presença de coliformes termotolerantes e apenas 5 ausência, e como a quantidade de amostras com ausência de coliformes ficou abaixo de 30, não foram realizados os cálculos variográficos para a variável coliformes termotolerantes, nos grupos A e B. No caso do parâmetro manganês, 18 amostras foram identificadas com valor igual a zero, o que implicou na exclusão deste parâmetro para os cálculos variográficos. Nas 34 amostras do grupo B, 10 apresentaram teor de amônia com valor igual a zero, o que resultou na exclusão deste parâmetro para os cálculos variográficos.

Os parâmetros dos modelos ajustados de semivariogramas para cada uma das variáveis constituintes dos grupos A e B estão disponíveis na tabela 5. Os parâmetros de ajuste dos semivariogramas das variáveis que formaram o grupo B foram calculados com os dados transformados pela função $f(x) = \ln(1+x) = \log_e^x$, onde e = Constante de Euler $\cong 2,718281828459045235360287...$ e x = valor do parâmetro observado. Para obter o valor

observado a partir de um valor transformado, basta fazer uso da relação $g(y) = e^y - 1$, onde y é o valor transformado e $g(y)$ é o valor observado para y .

Tabela 5. Parâmetros variográficos das variáveis nos grupos A e B

Grupo	Variável	C_0	$C_0 + C$	a (m)	GDE	Classificação	Modelo
A	Ferro	0,0009	0,00862	720	0,104	Forte	Esférico
	Cloreto	8,600	99,88	570	0,086	Forte	Exponencial
	Dureza	87,90	393,10	1281	0,224	Forte	Gaussiano
	Fluoreto	0,00002	0,01194	420	0,002	Forte	Esférico
	pH	0,014	0,436	430	0,032	Forte	Esférico
	Sulfato	37	102,6	5050	0,361	Moderado	Esférico
	Turbidez	0,153	1,053	630	0,145	Forte	Exponencial
	Nitrato	0,0910	0,731	730	0,124	Forte	Exponencial
B	Ferro	0,0015	0,060	4936	0,025	Forte	Gaussiano
	Cloreto	0,1357	0,2427	6030	0,559	Moderado	Exponencial
	Dureza	0,001	0,544	1490	0,002	Forte	Gaussiano
	Fluoreto	0,000196	0,00254	930	0,077	Forte	Esférico
	pH	0,00366	0,02026	7950	0,181	Forte	Exponencial
	Sulfato	0,328	1,248	3530	0,263	Moderado	Esférico
	Turbidez	1,355	3,03	7136	0,447	Moderado	Gaussiano
	Nitrato	0,093	0,821	3650	0,113	Forte	Esférico

Fonte: O autor

Com os parâmetros dos ajustes variográficos foram confeccionados os mapas de distribuição de valores estimados por krigagem ordinária, sendo cada mapa organizado em 10 classes, para cada parâmetro de água em cada grupo.

No grupo A foi possível observar que apenas uma classe ($0,3 \text{ mg/L} < x \leq 0,61 \text{ mg/L}$, $x =$ valor do parâmetro) ficou com valores de ferro acima do valor máximo permitido que é de $0,30 \text{ mg/L}$, conforme estabelecido na Portaria número 2.914/2011-MS (BRASIL, 2011); neste mapa os teores de ferro ficaram fortemente concentrados em duas classes $0,03 < x \leq 0,07$ e $0,07 < x \leq 0,10$, sendo SO-NE e SE-NO os sentidos preferenciais. Como no grupo B as classes estão em

valores transformados pela função $f(x) = \ln(1+x)$, com x = valor do parâmetro observado, então a partir da classe $0,267 < x \leq 0,358$ até a classe $0,811 < x \leq 0,883$, que equivalem, respectivamente, as classes em valores não transformados $0,31 < x \leq 0,43$ até $1,25 < x \leq 1,42$, os valores de ferro ficaram acima de 0,3 mg/L que é o máximo permitido pela Portaria número 2.914/2011-MS; neste caso, estas classes ficaram concentradas na porção centro-sul da área amostrada. A figura 5 contém os mapas de valores estimados por krigagem ordinária, para os teores de ferro nos grupos A e B.

Para os valores de cloreto nenhuma classe do grupo A ficou com limite acima de 250 mg/L, que é o valor máximo permitido pela Portaria número 2.914/2011-MS (BRASIL, 2011), sendo que as classes $11,4 < x \leq 14,8$ e $14,8 < x \leq 18,1$ ficaram com maior representatividade, preferencialmente, na faixa leste da área amostrada. No grupo B as classes estão em valores transformados pela função $f(x) = \ln(1+x)$, com x = valor do parâmetro observado, então a partir da classe $2,74 < x \leq 2,83$ até a classe $3,11 < x \leq 3,20$, que equivalem, respectivamente, as classes em valores não transformados $14,49 < x \leq 15,95$ até $21,42 < x \leq 23,53$, os valores de cloreto ficaram abaixo de 250 mg/L que é o valor máximo permitido para potabilidade, conforme Portaria número 2.914/2011-MS; neste caso, estas classes ficaram concentradas preferencialmente na faixa leste da área amostrada. A figura 6 contém os mapas de valores estimados por krigagem ordinária, para os teores de cloreto nos grupos A e B.

Todas as classes de dureza do grupo A ficaram com limite abaixo de 500 mg/L, que é o valor máximo permitido para potabilidade, de acordo com a Portaria número 2.914/2011-MS (BRASIL, 2011), onde as classes $11,0 < x \leq 20,3$ e $20,3 < x \leq 29,6$ obtiveram maior representatividade acentuadamente na faixa oeste da área amostrada. No grupo B as classes de dureza estão em valores transformados pela função $f(x) = \ln(1+x)$, com x = valor do parâmetro observado, então todas as classes ficaram com os limites abaixo do valor máximo permitido para potabilidade, que é de 500 mg/L, de acordo com a Portaria número 2.914/2011-MS. A figura 7 contém os mapas de valores estimados por krigagem ordinária, para os teores de dureza nos grupos A e B.

As amostras que constituem os grupos A e B não apresentaram valores de flúor acima do máximo permitido para o padrão de potabilidade que é 1,5 mg/L, conforme a Portaria número

2.914/2011-MS. Na figura 8 constam os mapas de valores estimados por krigagem ordinária, para os teores de fluoreto nos grupos A e B.

Para os valores de pH nenhuma classe do grupo A ficou com limite acima do valor máximo permitido 9,5 mg/L, pela Portaria número 2.914/2011-MS; mas quase a totalidade da área amostrada, da classe $4,18 < x \leq 4,50$ até a classe $5,46 < x \leq 5,78$, ficou com valores abaixo do mínimo que é de 6,0. No grupo B as classes estão em valores transformados pela função $f(x) = \ln(1+x)$, com x = valor do parâmetro observado, então a partir da classe $1,70 < x \leq 1,74$ até a classe $1,91 < x \leq 1,95$, que equivalem respectivamente as classes em valores não transformados $4,47 < x \leq 4,70$ até $5,75 < x \leq 6,03$, onde os valores de pH ficaram abaixo de 6,0 mg/L que é o valor mínimo permitido para potabilidade, pela Portaria número 2.914/2011-MS; neste caso, estas classes ficaram concentradas preferencialmente na faixa que contorna a região central da área amostrada. A figura 9 contém os mapas de valores estimados por krigagem ordinária, para os teores de cloreto nos grupos A e B.

Para os teores de sulfato as amostras que constituem o grupos A não apresentaram valores acima do máximo permitido para o padrão de potabilidade que é de 250 mg/L (BRASIL, 2011). Na figura 10 constam os mapas de valores estimados por krigagem ordinária, para os teores de sulfato nos grupos A e B.

Para efeitos de potabilidade, pela Portaria 2.914/2011-MS, o valor máximo permitido de turbidez na água é de 5 uT, isto permitiu concluir que no mapa de valores estimados apenas a classe $1,2 < x \leq 5,6$ do grupo A apresentou valores aceitáveis de turbidez. Como o mapa do grupo B foi construído com valores transformados, então três classes, ou seja, as classes com limites abaixo de 1,79 uT (o que equivale a 5 uT em valores não transformados) foram as únicas que apresentaram valores excedentes do máximo permitido. Na figura 11 constam os mapas de valores estimados por krigagem ordinária, para os teores de turbidez nos grupos A e B.

Pela Portaria 2.914/2011-MS, o valor máximo permitido de nitrato na água é de 10 mg/L, o que permitiu concluir que no mapa de valores estimados para a área, a porção SO (sudoeste) foi a que apresentou valores acima do máximo permitido. O mapa do grupo B foi construído com valores transformados, então as classes com limites superiores a 2,40 mg/L (o que equivale a 10

mg/L em valores não transformados) ficaram acima do máximo permitido para potabilidade. Na figura 12 constam os mapas de valores estimados por krigagem ordinária, para os teores de nitrato nos grupos A e B.

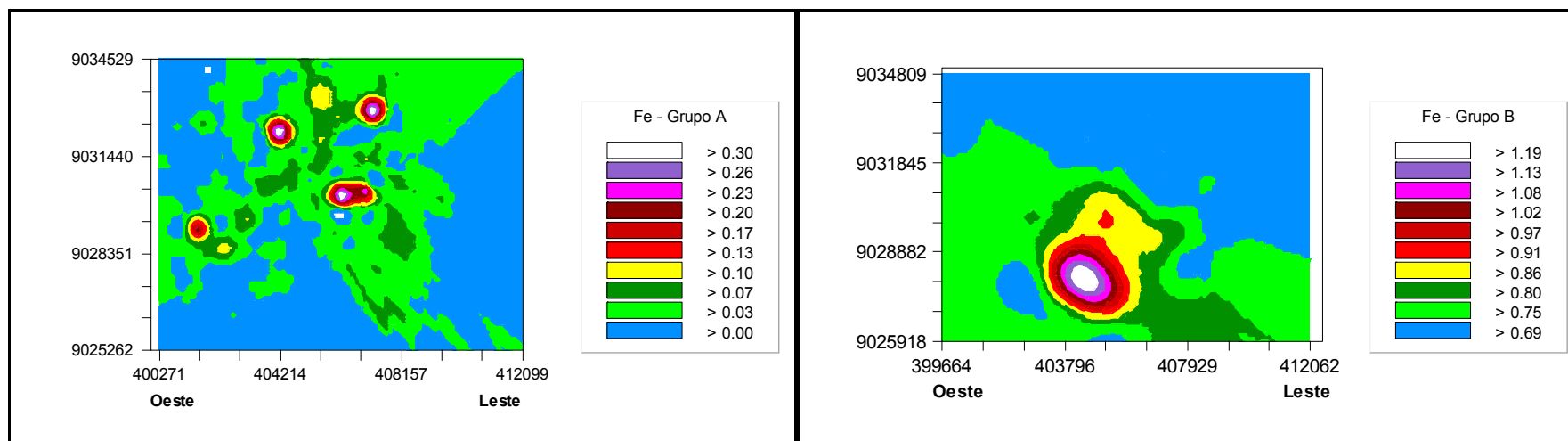


Figura 5. Mapas de krigagem ordinária para valores de ferro

Fonte: O autor

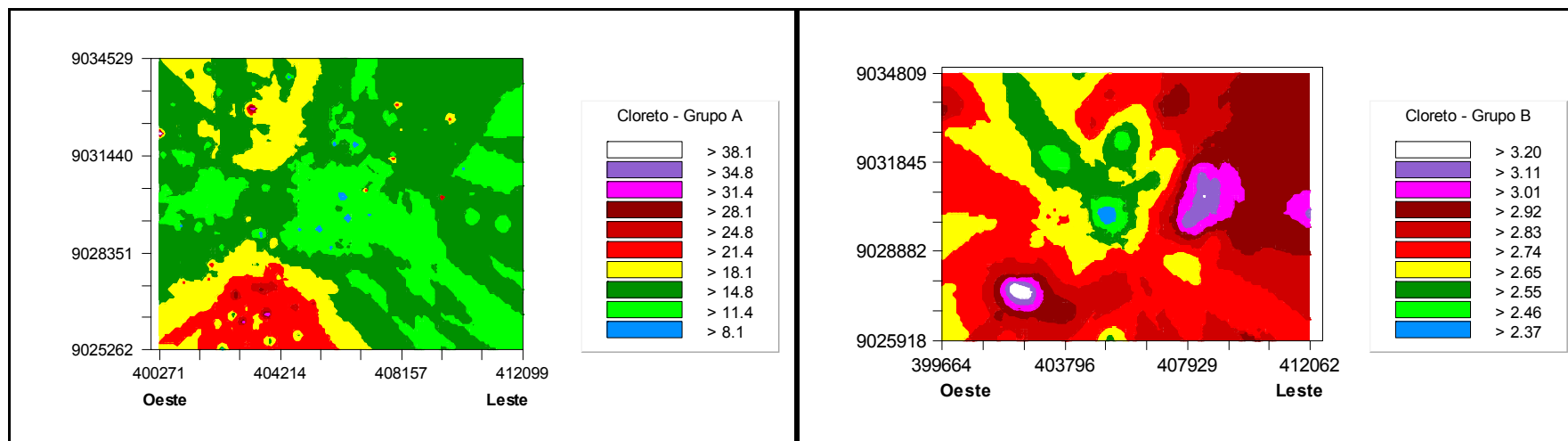


Figura 6. Mapas de krigagem ordinária para valores de cloreto

Fonte: O autor

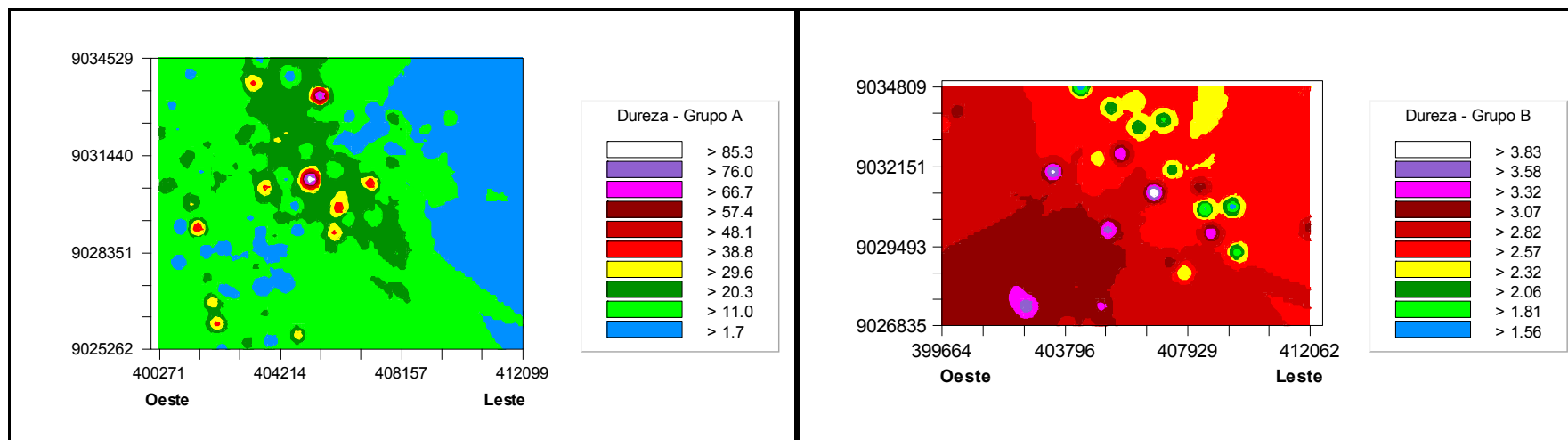


Figura 7. Mapas de krigagem ordinária para valores de dureza

Fonte: O autor

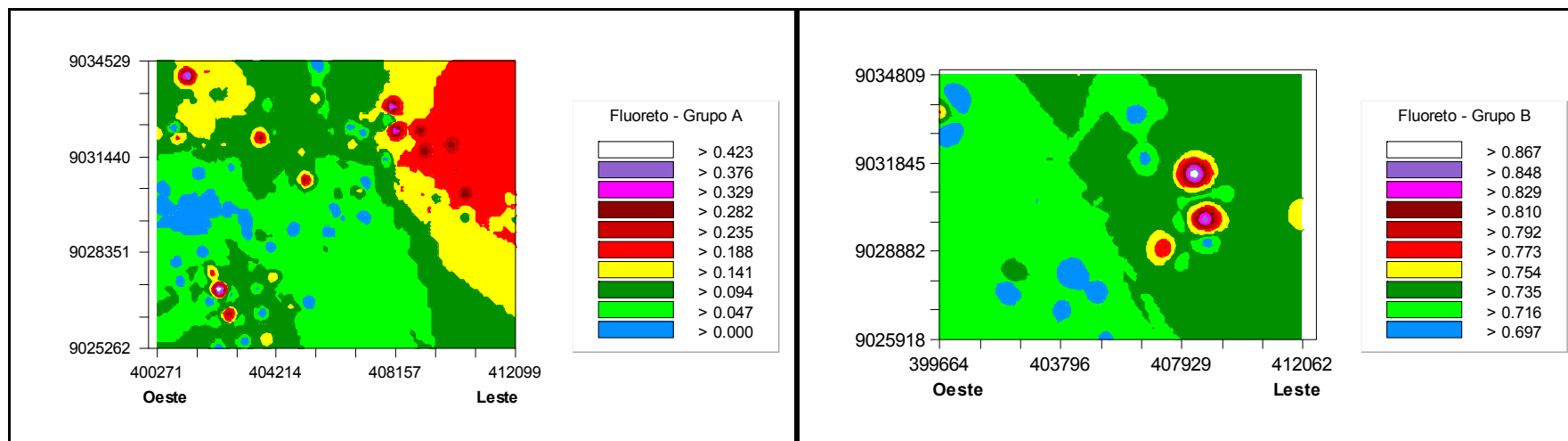


Figura 8. Mapas de krigagem ordinária para valores de fluoreto

Fonte: O autor

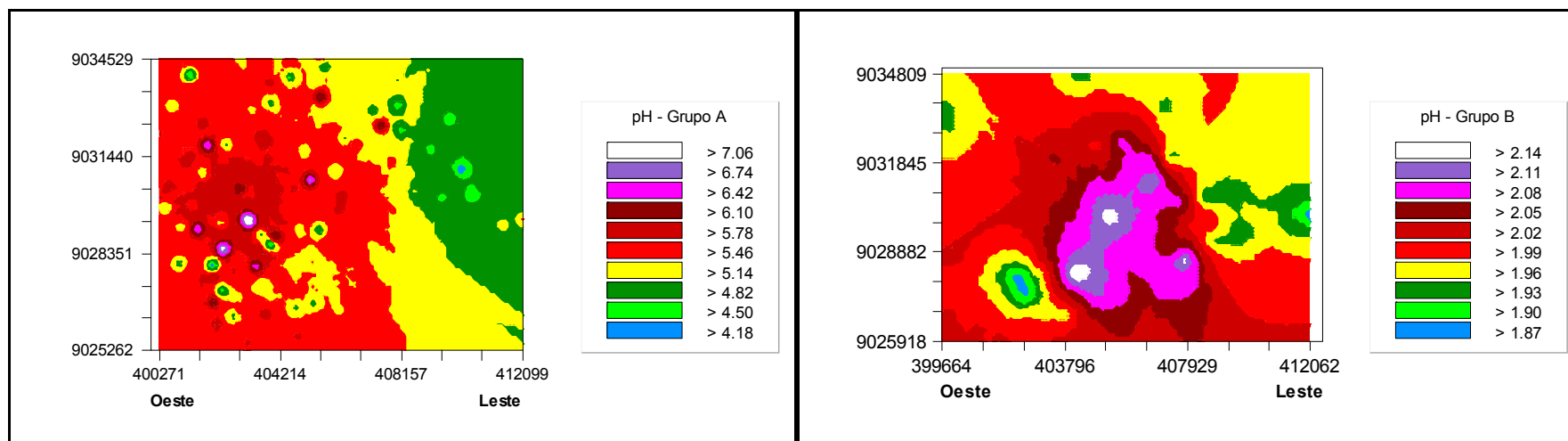


Figura 9. Mapas de krigagem ordinária para valores de pH

Fonte: O autor

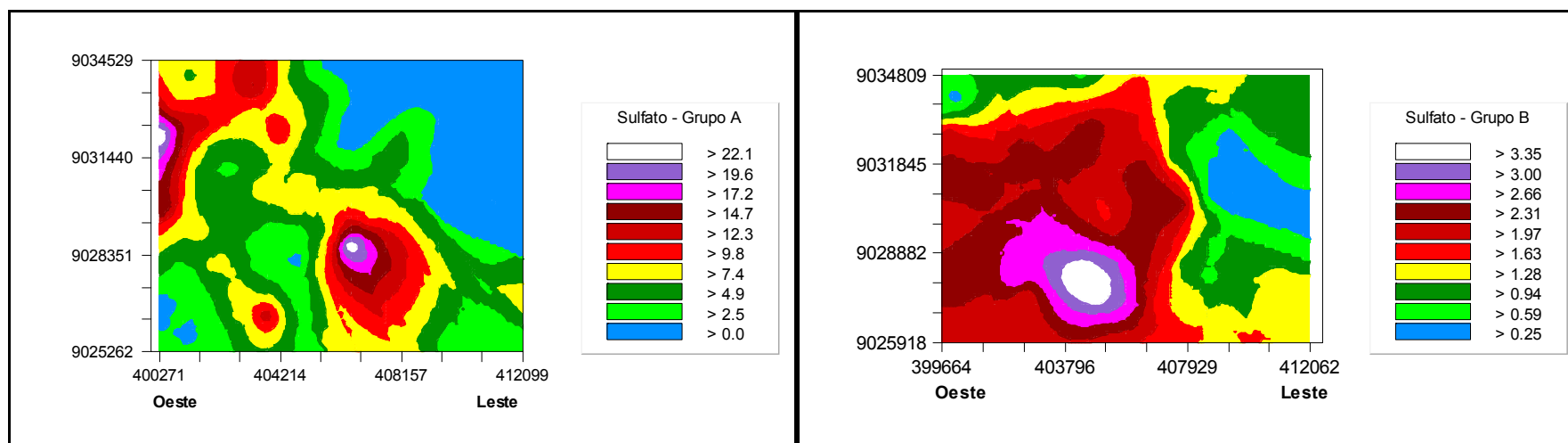


Figura 10. Mapas de krigagem ordinária para valores de sulfato

Fonte: O autor

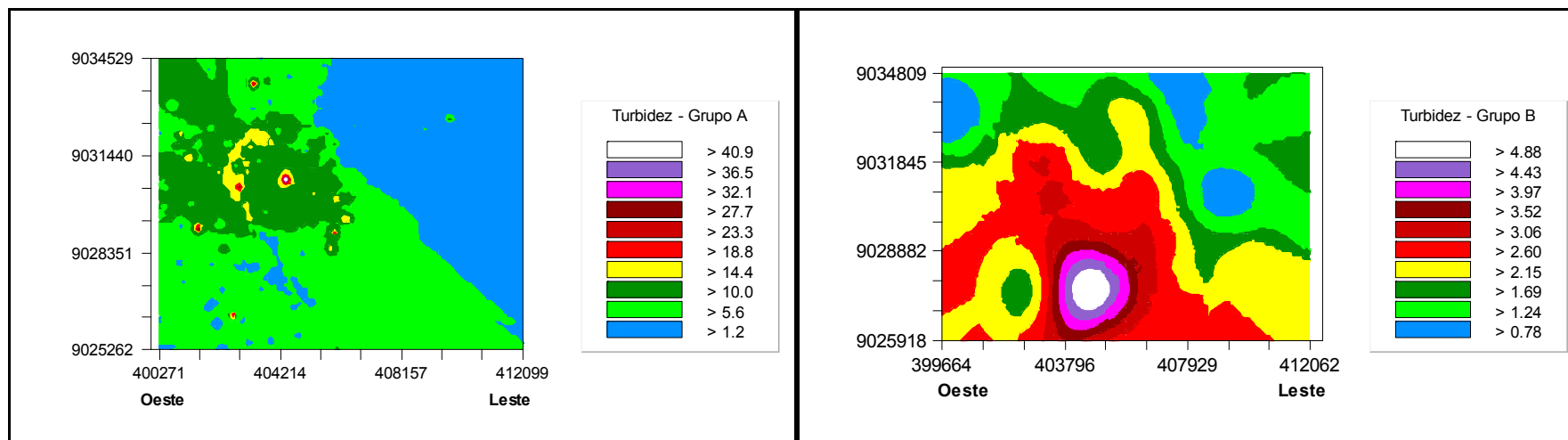


Figura 11. Mapas de krigagem ordinária para valores de turbidez

Fonte: O autor

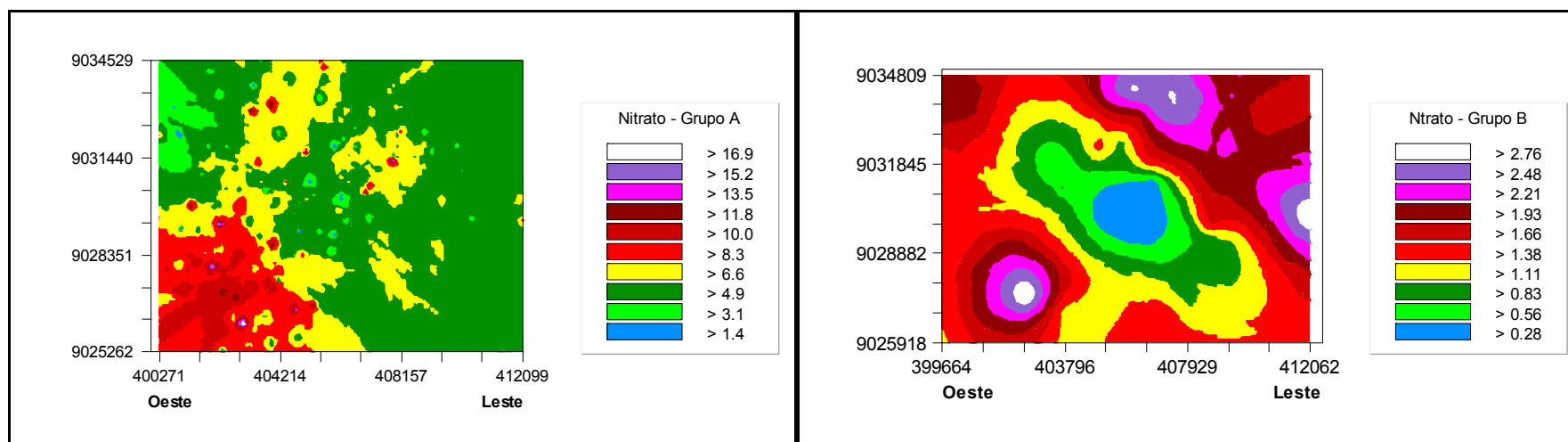


Figura 12. Mapas de krigagem ordinária para valores de nitrato

Fonte: O autor

Com os valores dos IQAS dos 141 poços amostrados foi possível obter o ajuste do semivariograma disponível na figura 13.

Parâmetros variográficos do IQAS

Ajuste = Esférico

Efeito pepita (C_0) = 218

Patamar ($C_0 + C$) = 815

Amplitude (a) = 1000 m

GDE = 0,28

Classificação do GDE = Moderado

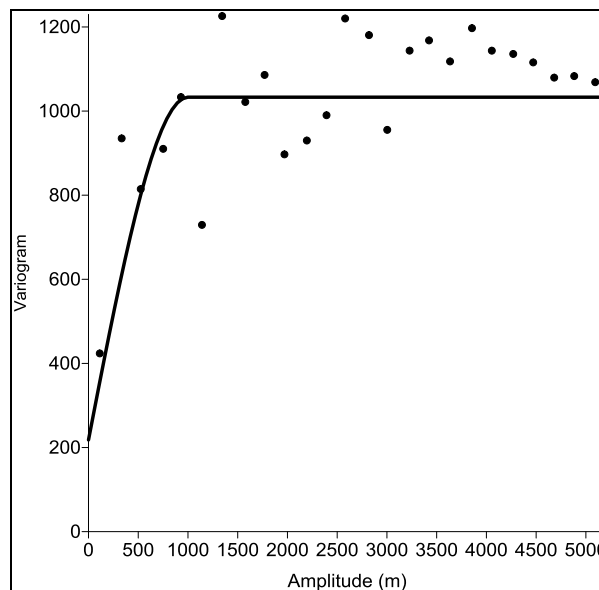


Figura 13. Semivariograma para IQAS

Fonte: O autor

Em função da existência de dependência espacial com alcance de 1000 metros identificada a partir do ajuste do semivariograma teórico de modelo esférico aos dados experimentais dos índices de qualidade de água subterrânea, os parâmetros deste semivariograma foram utilizados para confeccionar o mapa de valores estimados por krigagem ordinária dos IQAS. Neste mapa constam dezesseis classes de IQAS sobre a área estimada, onde o intervalo mais crítico é $10 \leq \text{IQAS} \leq 50$ com destaque em tom de cinza mais escuro e estas manchas são predominantes na faixa leste da área pesquisada, onde se encontram diversos bairros (Flodoaldo Pontes Pinto, Juscelino Kubstchek, Três Marias, etc.) com renda per capita abaixo de um salário mínimo, forte adensamento populacional e demanda reprimida de abastecimento público de água potável, combinado com a ineficiência de atendimento da rede de esgoto e cultura de uso de poços amazônicos.

No mapa constante na figura 14, as manchas em tom de cinza mais claro indicam os melhores valores estimados de IQAS sobre a área amostrada.

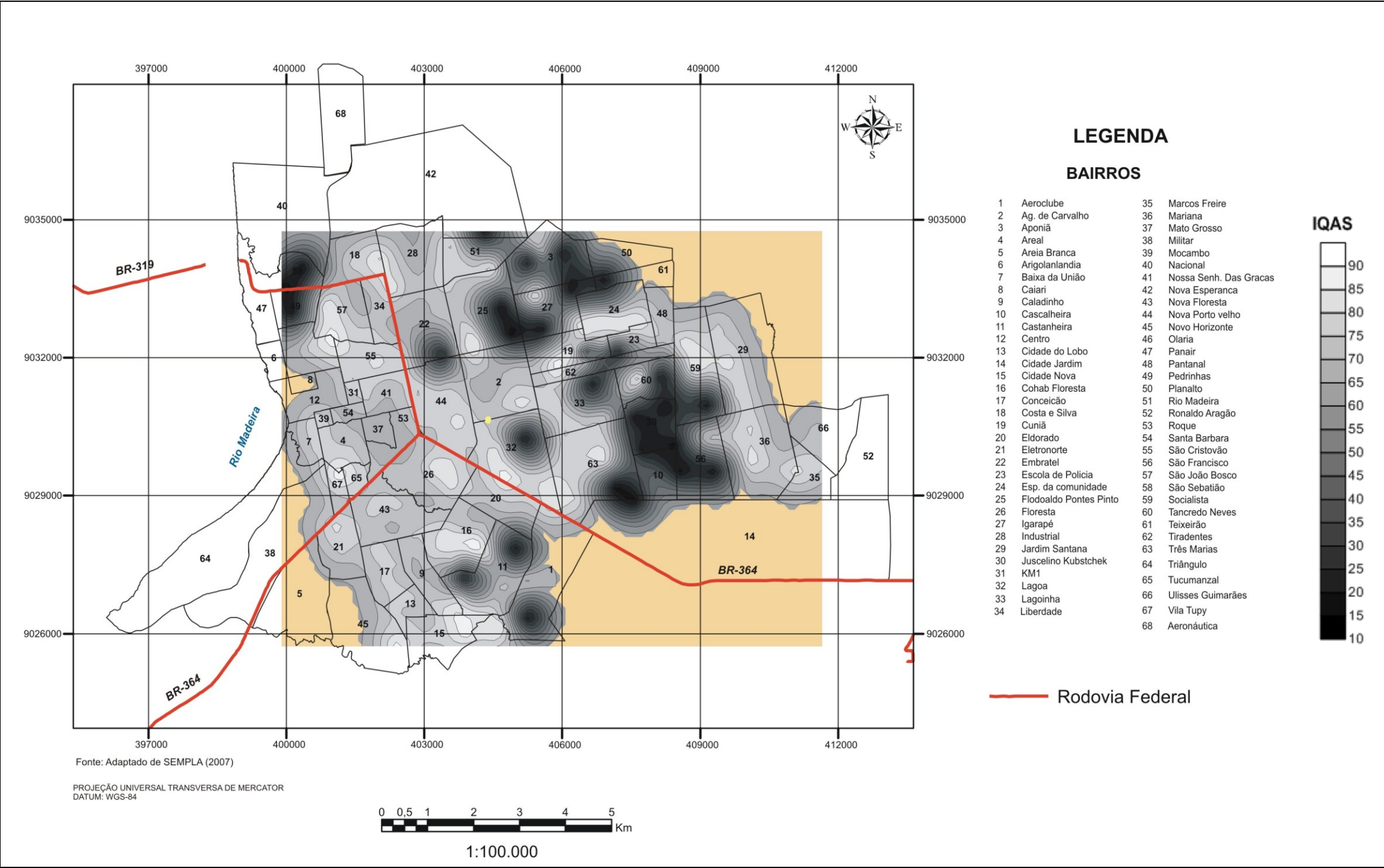


Figura 14. Mapa de valores de IQAS estimados por krigagem ordinária
Fonte: Adaptado de Sempla (2007)

5. DISCUSSÃO

Sobre as amostras analisadas foram identificados com maior ênfase que, os valores dos parâmetros coliformes termotolerantes, pH, turbidez e nitrato não atenderam as exigências de potabilidade estabelecidas na Portaria número 2.914/2011-MS (BRASIL, 2011), nas unidades estratigráficas Formação Jaciparaná, Lateritos Imaturos e Complexo Jamari. Os quatro parâmetros citados têm origem natural e antropogênica, mas para efeitos de gestão de recursos hídricos torna-se relevante o conhecimento da proporção destas origens, ou seja, é importante saber qual ação (natural ou antropogênica) está com maior influência de contribuição nas alterações dos teores desses parâmetros em cada unidade estratigráfica.

Dos 141 poços analisados, 29 foram enquadrados na classe ruim, pois tiveram IQAS variando de zero até 50. Este fato também está associado aos modelos matemáticos adotados, pois no caso da relação que envolve os coliformes termotolerantes só existem duas opções de resultado: zero ou cem e, como o IQAS é o resultado de um produto de diversos fatores onde um deles é formado pelos valores de presença ou ausência de coliformes termotolerantes (sendo que o padrão de potabilidade constante na Resolução 2.914/2011-MS é verificado pela presença/ausência desses coliformes) então, quando um dos fatores for igual a zero, o IQAS, naturalmente, será igual a zero. Além disso, a maioria absoluta dos poços que tiveram IQAS classificados como ruim estão em bairros de Porto Velho, como por exemplo, Flodoaldo Pontes Pinto, Juscelino Kubstchek e São Francisco, cujo histórico da qualidade de águas subterrâneas rotineiramente tem recebido crítica da mídia e alerta de diversos pesquisadores (LIMA et al., 2008; RODRIGUES, 2008; NASCIMENTO et al, 2011a; NÓBREGA II et al., 2011).

Os mapas dos parâmetros que foram elaborados com valores estimados por krigagem ordinária permitiram a obtenção de informações de forma rápida e concisa, sobre a distribuição dos teores na área de estudo para cada parâmetro estudado. Também foi confeccionado um mapa com valores dos índices de qualidade de água subterrânea estimados por krigagem ordinária, que foi significativo e elucidou locais em Porto Velho onde, de fato, existem poços cuja qualidade da água é inadequada para consumo humano. Considerando as formas de preservação, exploração,

uso das águas subterrâneas e as características hidrogeológicas da área amostrada, torna-se importante, também, saber se os parâmetros amostrados são suficientes para gerar informações que possam subsidiar os gestores a desenvolver ações que visam suprir as demandas de água potável em Porto Velho sem comprometer o futuro das próximas gerações.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os parâmetros coliformes termotolerantes, ferro, pH, turbidez e nitrato estavam com valores que não atenderam as exigências de potabilidade estabelecidas na Portaria número 2.914/2011-MS nas três unidades estratigráficas envolvidas na área amostrada, Formação Jaciparaná, Lateritos Imaturos e Complexo Jamari. A alteração dos valores dos parâmetros mencionados é uma demonstração natural de que a forma de preservação, exploração e uso das águas subterrâneas em Porto Velho, adotada pelos gestores e usuários, não atendeu as demandas de forma satisfatória em relação aos padrões de potabilidade estabelecidos na Portaria número 2.914/2011-MS; por isto, se fizerem necessárias a implantação de ações que sejam capazes de atenuar e reverter este quadro, como por exemplo, difusão e ampliação do conhecimento dos recursos hídricos subterrâneos.

Os mapas que foram elaborados com valores estimados dos parâmetros por krigagem ordinária, permitiram a obtenção de informações de forma rápida e concisa sobre a distribuição espacial dos teores de ferro, cloreto, dureza, fluoreto, pH, sulfato, turbidez e nitrato, na área de estudo. Já é sabido em relação a potabilidade da água para consumo humano, que o risco oferecido à saúde pública é diretamente proporcional ao aumento dos valores dos parâmetros, quando estes valores se encontram acima do valor máximo permitido; neste caso, para contenção e/ou avanço deste risco, se faz necessário que gestores e usuários executem ações com rapidez e precisão, como por exemplo, o levantamento pontual de locais de poços que apresentem parâmetros com valores alterados.

Com os resultados dos índices de qualidade de água subterrânea foi possível identificar a insuficiência de qualidade das águas subterrâneas para consumo humano em diversos poços distribuídos em bairros de Porto Velho. O mapa elaborado com valores estimados de IQAS por krigagem ordinária serviu para revelar os locais – bairros de Porto Velho, com maior ou menor valor de IQAS - índice de qualidade de água subterrânea. Como em Porto Velho, 95% do esgoto doméstico não tem tratamento não fica difícil associar os valores baixos de IQAS com a falta de tratamento de esgoto doméstico. Neste contexto, as informações sobre distribuição dos valores de

IQAS são relevantes para que gestores e usuários efetuem, por exemplo, ações como o monitoramento das águas subterrâneas para prover informações sobre a qualidade e a dinâmica do aquífero em relação às variações sazonais e efeitos das ações antropogênicas.

Os índices que foram apresentados neste trabalho merecem aperfeiçoamento pelo fato de não contemplarem alguns parâmetros de água subterrânea e que são relevantes como indicadores de qualidade, como por exemplo, condutividade elétrica, alumínio, mercúrio total, benzeno e temperatura da água.

Embora as cidades brasileiras se organizem administrativamente por bairros sem levar em conta os limites geográficos de aquíferos ou as divisões das unidades estratigráficas, neste trabalho foi feita a identificação dos parâmetros de águas subterrâneas cujos valores não atendem as exigências de potabilidade da água para consumo humano previstas em lei, em cada unidade estratigráfica. Não menos importante é a realização de pesquisa que permita também a identificação da proporção das origens das ações natural e antropogênica, que causaram a alteração inaceitável dos valores dos parâmetros de águas subterrâneas; tendo em vista a importante necessidade de conhecimento sobre a qualidade, forma de uso da água, capacidade de armazenamento dos aquíferos, exploração e recarga dos aquíferos para melhor compreender, proteger e aperfeiçoar o uso das águas subterrâneas.

Aos gestores de Porto Velho que intencionarem melhorar suas tomadas de decisão no setor de recursos hídricos, o recomendado é que devam fazer uso simultâneo de informações provenientes de IQAS e de informações geradas pelas aplicações de técnicas geoestatística, pois estas informações irão contribuir forte e positivamente na implantação de um sistema de gestão integrado entre as águas subterrâneas e as superficiais; tendo em vista a notável necessidade de executar ações que visam o suprimento de demandas de água para consumo humano, sem comprometer o futuro das próximas gerações.

7. REFERÊNCIAS

- ADAMY, Amilcar, ROMANINI, Sérgio José (Orgs.) Geologia da Região Porto Velho-Abunã; folhas Porto Velho (SC.20-V-B-V), Mutumpanará (SC.20-D-I) e Abunã SC.20-V-C-V) estados de Rondônia e Amazonas. Brasília: DNPM/CPRM, 1990. 273p. (Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil-PLGB).
- ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. São Leopoldo-RS: Editora da UNISINOS, 2004. 165 p.
- ALMEIDA, R. A. S. **Índice de qualidade de águas subterrâneas destinados ao uso na produção de água potável (IQUAS)**. Salvador, 2007. 188 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana da Escola Politécnica), Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2007.
- AMARAL, G. **Província Tapajós e província Rio Branco**. In: ALMEIDA, F.F.M. de e HASUI, Y. O Pré-Cambriano do Brasil. São Paulo: Edgard Blucher, 1984. p.6-35.
- AMORIM, J. R. A.; CRUZ, M. A. S.; RESENDE, R. S. Qualidade da água subterrânea para irrigação na bacia hidrográfica do rio Piauí, em Sergipe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v. 14, n. 8, p. 804-811, 2010.
- APHA – American Public Health Association; AWWA – American Water Works Association & WEF – Water Environmental Federation. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. Eaton, A.D.;L.S. Clesceri; A.E. Greeberg (Ed.). Wahington, D.C., 1990.
- BACCAN, N.; ANDRADE, J. C.; GODINHO, O. E. S.; BARONE, J. S. **Química quantitativa elementar**. São Paulo: Edgard Blucher; Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 1979. 245 p.
- BAHIA, M. A. S. **Caracterização biogeoquímica de águas subterrâneas da zona urbana de Porto Velho**. Belém, 1997. 129 p. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geoquímica) - Universidade Federal do Pará, Belém, 1997.
- BRAGA., L. P. V.; Geoestatística e aplicações. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PROBABILIDADE E ESTATÍSTICA, 9., 1990, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IME-USP, 1990. p. 1-36.
- BRANDÃO, C. J.; BOTELHO, M. J. C.; SATO, M. I. Z.; LMPARELLI, M. C. (Orgs.). **Guia nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos**. São Paulo: CETESB; Brasília: ANA, 2011. 326 p.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resoluções do Conama: Resoluções vigentes publicadas entre setembro de 1984 e janeiro de 2012**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2012. 1126p.

_____. Ministério da Saúde. **Portaria MS nº 2.914/2011/**. Brasília: Editora do Ministério da Saúde, 2011. 32 p.

_____. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. **Vigilância e controle da qualidade da água para consumo humano**. Brasília: Ministério da Saúde/Secretaria de Vigilância em Saúde, 2006a. 212p.

_____. Fundação Nacional de Saúde. **Manual prático de análise de água**. Brasília: Fundação Nacional de Saúde, 2006b. 146p.

BUSSAB, W. O.; MORETTIN, P. A. **Estatística básica**. São Paulo: Editora Saraiva, 2002. 526 p.

CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURCO, R.F.; end KONOPKA, A.E. **Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soils**. Soil Science Society America Journal, Madison, v.58, p.1240-1248, 1994.

CALVETE, F.J.S.; RAMÍREZ J.C. **Geoestadística: aplicaciones a la hidrología subterránea**. Centro Internacional de Métodos Numéricos em Ingeniería Barcelona, 1990. 484 p.

CAMPOS, J. C. V.; SILVA FILHO, E. P.; OLIVEIRA, I. R. Contaminação do aquífero Jaciparaná na cidade de Porto Velho (RO). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 13, 2004, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: ABAS, 2004. 1 CD-ROM.

_____.; DREWS, M. G. P. **Avaliação do potencial hidrogeológico da área urbana do distrito de Extrema município de Porto Velho RO**. Relatório Técnico – convênio CPRM/FNS. Porto Velho: CPRM, 1999a. 23p.

_____.; _____. **Avaliação do potencial hidrogeológico da área urbana do distrito de Nova Califórnia município de Porto Velho RO**. Relatório Técnico – convênio CPRM/FNS. Porto Velho: CPRM, 1999b. 19p.

_____. Avaliação preliminar do potencial hidrogeológico da cidade de Porto Velho (RO). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 10, 1998, São Paulo. **Anais eletrônicos...** Curitiba: UFPR, 1998. Disponível em: < <http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/asubterraneas/article/view/22238/14583> >. Acesso em: 02 mar. 2012.

CELLIGOI, A. considerações sobre análise químicas de águas subterrâneas. **Geografia**, Londrina, v.8, n.1, p.91-97, jan-jun 1999.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Qualidade das águas interiores no Estado de São Paulo**. Série Relatórios – Apêndice A. São Paulo: CETESB, 2009. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/agua/aguas-superficiais/variaveis.pdf>>. Acesso em: 14 dez 2013.

_____. **Norma técnica L5. 202. Determinação de coliformes totais em água– técnica de tubos múltiplos: método de ensaio**. São Paulo: CETESB, 1993a. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/servicos/normas-cetesb/40-normas>>. Acesso em: 27 mai 2012.

_____. **Norma técnica L5. 113. Determinação de cloreto em água – método do nitrato mercúrio: método de ensaio**. São Paulo: CETESB, 1993b. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/servicos/normas-cetesb/40-normas>>. Acesso em: 27 mai 2012.

_____. **Norma técnica L5. 124. Determinação de dureza em água – método titulométrico do EDTA: método de ensaio**. São Paulo: CETESB, 1992. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/servicos/normas-cetesb/40-normas>>. Acesso em: 27 mai 2012.

_____. **Norma técnica L5. 184. Determinação de ferro em água – método colorimétrico-automático com ortofenantrolina: método de ensaio**. São Paulo: CETESB, 1991. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/servicos/normas-cetesb/40-normas>>. Acesso em: 27 mai 2012.

_____. **Norma técnica L5. 400. Determinação de fluoreto em água – método do eletrodo de íon seletivo: método de ensaio**. São Paulo: CETESB, 1987. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/servicos/normas-cetesb/40-normas>>. Acesso em: 27 mai 2012.

_____. **Norma técnica L5. 156. Determinação de turbidez em água – método nefelométrico: método de ensaio**. São Paulo: CETESB, 1978a. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/servicos/normas-cetesb/40-normas>>. Acesso em: 27 mai 2012.

_____. **Norma técnica L5. 137. Determinação de nitrogênio nitrato em água – método de ácido fenoldissulfônico: método de ensaio**. São Paulo: CETESB, 1978b. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/servicos/normas-cetesb/40-normas>>. Acesso em: 27 mai 2012.

_____. **Norma técnica L5. 136. Determinação de nitrogênio amoniacal em água – método de nesslerização com destilação prévia: método de ensaio**. São Paulo: CETESB, 1978c. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/servicos/normas-cetesb/40-normas>>. Acesso em: 27 mai 2012.

ELWELL, T.W. and GIDLEY, F.A.J. **Atomic absorption spectrophotometry**. England: Pergamon Press, 1967.

FEITOSA, E. C.; FEITOSA, F. A. C. Metodologia básica de pesquisa de água subterrânea. In: FEITOSA, F. A. C.; et al. (Org.). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, 2008. p. 179-207.

FENZL, N. **Introdução à hidrogeoquímica**. Belém: Universidade Federal do Pará, 1986. 189 p.

FILLIBEN, J.J. The probability plot correlation coefficient test for normality. **Technometrics**, p.111-117, 1975.

GOLDEN SOFTWARE, INC. **Surfer for windows: User's guide**, Colorado, USA. 2002. 640 p.

GUERRA, P. A. G.. **Geoestatística operacional**. Brasília: Departamento Nacional da Produção Mineral, 1988. 145 p.

GUIMARÃES, E. C.. **Geoestatística básica e aplicada**. Material didático. Uberlândia-MG. UFU/FAMAT: Núcleo de estudos estatísticos e biométricos, 2004. 48 p.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **Applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 561 p.

JOURNEL, A. G.; HUIJBREGTS, C. J. **Mining geostatistics**. London: Academic Press, 1978. 599 p.

LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos**. São Paulo: Editora da UNESP, 2003. 253 p.

LIMA, M. L. A.; CHAVES, C. A. P.; MELO JUNIOR, H. R.; SIMÃO, F. B. Aplicação de métodos geoestatísticos para mapeamento de área de risco em saúde pública no município de Porto Velho-RO. **Vita et Sanitas**, Trindade-GO, v. 2, n. 02, 2008.

MACBRATNEY, A.B.; WEBSTER, R. Choosing functions for semivariograms for soil properties and fitting to sampling estimates. **Journal of Soil Science**, v.37, p.617-639, 1986.

MANOEL FILHO, J. Evolução histórica do conhecimento. In: FEITOSA, F.A.C.; et al. (Org.). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, 2008. p. 5-12.

MANZIONE, R. L. **Variabilidade espacial de atributos químicos do solo em Araguari-MG . Botucatu , 2002**. 141 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrônomicas), Faculdade de Ciências Agrônomicas da UNESP – Campus de Botucatu, Botucatu-SP, 2002.

MORAIS, P.R.C. **Mapa hidrogeológico do Estado de Rondônia**: texto explicativo, escala 1: 1.000.000. Porto Velho: CPRM, 1998, 32p. Programa Recursos Hídricos.

NASCIMENTO, G. F.; ZUFFO, C. E.; GOVEIA, G. R. T.; SANTOS, O. O. Índice de qualidade de águas superficiais da bacia hidrográfica do alto e médio rio Machado – RO. In: CARMELLO et al. (Orgs). **Amazônia: recursos hídricos e diálogos socioambientais**. Curitiba: CRV, 2011a. p.165-170.

_____; _____. Qualidade de águas superficiais da bacia hidrográfica do alto e médio rio Machado – RO. In: CARMELLO et al. (Orgs). **Amazônia: recursos hídricos e diálogos socioambientais**. Curitiba: CRV, 2011b. p.181-186.

_____; _____. MOTA, I. O. Características da qualidade das águas subterrâneas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 19, 2011, **Anais...** Maceió. Maceió: ABRH, 2011c. p. 89.

_____. LANDIM, P. M. B. Agricultura de precisão por metodologia geoestatística: aplicação em solos de Rondônia. In: SIMPÓSIO DE GEOESTATÍSTICA APLICADA EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS, 1, 2009, Botucatu-SP. **Anais eletrônicos...** Botucatu-SP: UNEP, 2009. Disponível em: <<http://www.fca.unesp.br/sgea/Docs/19.pdf>>. Acesso em: 15 jan. 2012.

_____. **Agricultura de precisão por metodologia geoestatística: aplicação em solos do Estado de Rondônia**. Porto Velho, 2008. 107 p. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente), Instituto de Geociências e Ciências Exatas - UNESP, Rio Claro-SP, 2008.

NASCIMENTO, F. M. F.; CARVALHO, J. M.; PEIXINHO, F. C. Sistema de informação de águas subterrâneas – SIAGAS: histórico, desafios e perspectivas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 15, 2008, Natal. **Anais eletrônicos...** Natal: ABRH. Disponível em < http://www.cprm.gov.br/publique/media/evento_flavia.pdf >. Acesso em: 22 jan. 2012.

NÓBREGA II, M.; CAJAZEIRAS, C. C. A.; OLIVEIRA, E. M.; NASCIMENTO, G. F. Aplicação de geoestatística na análise de parâmetros de águas subterrâneas em Porto Velho - RO. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 12, 2011, Boa Vista. **Anais...** Boa Vista: SBG - NO, 2011.

OLIVEIRA, I. B.; NEGRÃO, F. I.; SILVA, A. G. L. S. Mapeamento dos aquíferos do Estado da Bahia utilizando o índice de qualidade natural das águas subterrâneas - IQNAS. **Águas Subterrâneas**, São Paulo, v. 21, n. 1, p. 123-137, 2007.

OMS - ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. **Guías para la calidad del agua potable**. Ginebra: OMS, 1995. 195p.

PANNATIER, Y. **Variowin – Software for spatial data analysis in 2D**. New York: Springer-Verlag, 1996. 90p.

PIVELI, F. **Qualidade das águas e poluição: aspectos físico-químicos**. Apostila - Aula 6. Disponível em: <<http://www.leb.esalq.usp.br/disciplinas/Fernando/leb360/Fasciculo%206%20-%20Alcalinidade%20e%20Acidez.pdf>>. Acesso em: 10 nov 2013.

PEREIRA, E.R.S. **Hidroggeoquímica da Ilha de Itaparica, Bahia**. Salvador, 2009. 146 p. Dissertação (Mestrado em Geologia Ambiental), Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2009.

ROBERTSON, G. P. **GS⁺: Geostatistical for the environmental sciences**. Plainwell, Michigan-USA: Gamma Design Software, 2008. 172 p.

RODRIGUES, E. R. D. **Avaliação espacial da qualidade da água subterrânea na área urbana de Porto Velho – Rondônia / Brasil**. Porto Velho, 2008. 70 p. Dissertação (Mestrado

em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente), Fundação Universidade Federal de Rondônia, Porto Velho, 2008.

SALVIANO, A. A. C. **Variabilidade de atributos do solo e de crotalaria juncea em solo degradado do município de Piracicaba-SP**. Piracicaba, 1996. 91 p. Tese (Doutorado), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

SANTIAGO, M.R. **Análises das ocorrências anômalas de fluoreto em águas subterrâneas**. Santa Maria, 2010. 95p. Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria - UFSM. Santa Maria – RS, Santa Maria, 2010.

SANTOS, A. C. Noções de hidroquímica. In: FEITOSA, F.A.C.; et al. (Org.). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, 2008. p. 325-357.

SEMPLA – Secretaria Municipal de Planejamento de Porto Velho. **Plano diretor de Porto Velho – Folha SC-20.V-B-V, escala 1:100.000**. Prefeitura de Porto Velho: SEMPLA, 2007. Disponível em:
http://www.portovelho.ro.gov.br/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=606&Itemid=515. Acesso em: 23 dez 2013.

SKOOG, D.A.; WEST, D.M.; HOLLER, E.J.; CROUCH, S.R. **Fundamentos de química analítica**. Traduzido por GRASSI, M.T. São Paulo: Thomson, 2006. 999p.

SOARES, A. **Geoestatística para as ciências da terra e do ambiente**. Lisboa-Portugal: IST Press, 2006. 214 p.

VALENTE, J. M. G. P. **Geomatemática – Lições de geoestatística (volume III)**. Ouro Preto - MG: Fundação Gorceix, 1989. 203 p.

VIEIRA, S.R. **Curso de atualização em geoestatística**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1995, 76p.

WANDERLEY, V. J. R.; NASCIMENTO, G. F.; LANDIM, P. M. B. Uso de geoestatística na avaliação do comportamento espacial de volframita e cassiterita. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 10, 2007, Porto Velho. **Anais...** Porto Velho - RO: SBG - NO, 2007.

WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. **Statistical methods in soil and land resource survey**. Oxford: Oxford University Press, 1990. 316 p.

ZUFFO, C. E.; ABREU, F. A. M.; CAVALCANTE, I. N.; NASCIMENTO, G. F. Águas subterrâneas em Rondônia: Análise estatística de dados hidroquímicos, organolépticos e bacteriológicos. **Revista do Instituto de Geológico**, São Paulo, v. 30, n. (1/2), p. 45-59, 2009.