



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UnB
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - IG

**AVALIAÇÃO DOS MECANISMOS DE RECARGA NATURAL E
ESTABILIDADE HIDROQUÍMICA EM AQUÍFEROS RASOS,
SUL DO ESTADO DE TOCANTINS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO N° 29

JULIO HENRICHS DE AZEVEDO

Orientador:

Prof. Dr. José Elói Guimarães Campos

Brasília, Março de 2012.



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UnB
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - IG

**AVALIAÇÃO DOS MECANISMOS DE RECARGA NATURAL E
ESTABILIDADE HIDROQUÍMICA EM AQUÍFEROS RASOS,
SUL DO ESTADO DE TOCANTINS**

JULIO HENRICHS DE AZEVEDO

Banca Examinadora:

Prof. Dr. José Elói Guimarães Campos
Instituto de Geociências/Universidade de Brasília

Prof. Dr. Luciano Soares da Cunha
Instituto de Geociências/Universidade de Brasília

Prof.^a Dra. Leila Nunes Menegasse Velasquez
Instituto de Geociências/Universidade Federal de Minas Gerais

DEDICATÓRIA

Dedico aos meus pais Alfredo de Azevedo Filho e Elisa Henrichs de Azevedo, os quais, mesmo sem a oportunidade de frequentar qualquer banco de escola, sempre me incentivaram à constante busca pelo conhecimento.

E à minha filha Juliana Amaral de Azevedo, na qual deposito a esperança de que os jovens entendam que a sustentabilidade ambiental perpassa, necessariamente, por mudanças no comportamento humano.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, por me conceder saúde e capacidade de aprendizado, permitindo-me concluir mais essa importante etapa de minha vida.

Ao professor Dr. José Eloi Guimarães Campos, pelo estímulo no dia a dia e pelas orientações científicas, sem as quais não poderia ter levando este trabalho adiante. Agradeço, ainda, pela amizade que se consolidou durante o processo de orientação.

Ao Professor Dr. Geraldo Resende Boaventura, pela disponibilização do Laboratório de Geoquímica e pelos ensinamentos que me proporcionaram uma nova visão sobre a importância dos processos físico-químicos na qualidade ambiental.

Aos demais professores do IG que, por meio de sábios ensinamentos, foram capazes de ampliar meus conhecimentos técnico-científicos e, conseqüentemente, contribuir para a sustentação desta Dissertação.

À Universidade de Brasília e ao Programa de Pós Graduação do Instituto de Geociências, pela oportunidade da pós-graduação.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pela viabilização de recursos para as despesas correntes durante os trabalhos de campo.

Aos servidores do Instituto de Geociências, em especial aos técnicos do Laboratório de Geoquímica, Myller de Souza Tonhá e Fernando Souza Cavalcante, pelo auxílio prestado durante as análises.

Ao Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA, por meio das Diretorias de Licenciamento Ambiental - DILIC e de Planejamento Administração e Logística - DIPLAN, pelo apoio e autorização para minha efetiva participação no curso de mestrado.

Ao amigo e geólogo Jorge Luiz Britto Cunha Reis que, pela sua incomparável paixão pela geologia, foi capaz de contribuir, sobremaneira, na consolidação do meu interesse pelas geociências.

Ao químico e colega de trabalho Adriano Bezerra, pelas constantes discussões relativas ao comportamento químico das águas naturais.

À geóloga e companheira Roseli dos Santos Souza, pela compreensão, constantes estímulos e auxílios na revisão deste trabalho.

À geóloga Joyce Fiori, pelo valioso auxílio técnico e disponibilização de produtos cartográficos.

À Empresa Ambiental Tecnologia Ltda e ao Consórcio Enerpeixe, pela disponibilização de informações e dados sobre as áreas de estudo, bem como por permitirem a utilização dos pilotos de recarga artificial como unidades de pesquisa.

Aos proprietários dos lotes rurais onde se localizam os sítios amostrais, por abrirem as portas das propriedades à pesquisa científica, e, particularmente, ao produtor rural Noé Caldeira Gomes, pela hospitalidade, disponibilidade em prestar auxílios e fornecimento de dados pluviométricos locais.

Aos membros da banca examinadora, pela presença, disponibilização de tempo para análise deste texto dissertativo e, especialmente, pelas imprescindíveis contribuições.

A todos os amigos, pelos incentivos, e a todas as pessoas e instituições que, de alguma forma, contribuíram para o desenvolvimento e finalização desta Dissertação.

RESUMO

Quatro áreas dos municípios de São Salvador do Tocantins e Paranã, Sul do estado do Tocantins, foram investigadas objetivando avaliar as formas de recarga natural e o comportamento da estabilidade química das águas dos aquíferos freáticos. Os sítios amostrais compreenderam 30 poços rasos (tipo cisternas), integrantes do sistema de abastecimento de alguns dos lotes rurais, cujas águas apresentaram concentrações iônicas elevadas. A aquisição de dados envolveu a realização de 2 campanhas de amostragem das águas para fins de análises físico-químicas em laboratório, 11 campanhas de monitoramento de parâmetros hidroquímicos *in situ*, e desenvolvimento de ensaios e testes voltados à avaliação das propriedades físicas das zonas vadosa e saturada. Com a conclusão dos estudos foi possível alcançar os seguintes resultados: classificação das águas em bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas; identificação dos equilíbrios químicos predominantes no sistema aquífero, particularmente no que se refere aos processos de solubilização e precipitação do carbonato de cálcio; compreensão dos modelos de fluxo subterrâneo; identificação do comportamento da recarga natural, diretamente dependente dos condicionantes pedológicos; e avaliação da eficiência de sistemas pilotos de recarga artificial anteriormente instalados, os quais apresentam tendência de funcionalidade potenciométrica, porém, sem alteração das concentrações iônicas, em razão da condição de tamponamento químico naturalmente existente nos sistemas aquíferos. Por meio do processamento dos dados hidroquímicos foi identificado que o pH de equilíbrio das águas é 6.7, de forma que, com a entrada de águas levemente ácidas provenientes das chuvas ocorre solubilização do carbonato de cálcio e consequente elevação dos teores de sais nas águas subterrâneas. Cessado o aporte de água durante o período de estiagem, o pH do sistema se eleva e, como consequência, inicia-se a precipitação do carbonato de cálcio, de forma a se estabelecer o equilíbrio iônico do sistema, independentemente do volume de água armazenado nos aquíferos.

Palavras-chave: Recarga de aquífero, equilíbrio iônico, aquíferos freáticos.

ABSTRACT

Four areas of the São Salvador do Tocantins and Paranã counties, south of Tocantins state, Brazil, were investigated objectifying to evaluate the natural recharge and the behavior of the chemical stability of groundwater of shallow aquifers. The sample sites include 30 shallow wells of the local water supplying system, whose waters had presented certain chemical hardness. The acquisition of data involved the accomplishment of 2 campaigns of water sampling for complete chemical analyses in laboratory, 11 campaigns of monitoring of hydrochemical in situ parameters, and development of some field-tests to evaluation the physical properties of the vadose and saturated zones. By the conclusion of the study, it was possible to reach the follow results: classification of the groundwater in bicarbonate calcium or magnesium waters; identification of predominant chemical equilibrium in the aquifer system, particularly for the solubilization and precipitation processes of calcium carbonate; understanding of the groundwater flow models; identification of the behavior of the natural recharge, which is directly dependent of the soils conditionings; and evaluation of the efficiency of pilots plants of artificial recharge, which had presented trend of quantitative functionality, however, without alteration of the totals dissolved solid (TDS), due to the natural condition of existing chemical stability in the groundwater systems. By the processing of the hydrochemical data it was identified that the pH of equilibrium is 6.7, which cause the solubilization of calcium carbonate by the entrance of acid water from rains and consequently rises the ion water content of the groundwater. Ceased the water entrance in the dry season the pH of the system raises, and cause the precipitation of calcium carbonate, to establish the ionic equilibrium of the system, independently of the water volume stored in the aquifers.

Keywords: Groundwater recharge, ionic equilibrium, shallow aquifers.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Considerações Iniciais.....	1
1.2 Localização.....	2
1.3 Contextualização do Problema.....	3
1.4 Objetivos.....	4
1.5 Justificativas.....	4
CAPÍTULO II – MATERIAIS E MÉTODOS.....	6
2.1 Sistema de Recarga Artificial – Sistema Piloto de Recarga.....	7
2.2 Levantamento de Informações Preexistentes.....	10
2.3 Etapas de Campo.....	10
2.3.1 Reconhecimento da Área de Estudo.....	10
2.3.2 Amostragens e Monitoramento <i>in situ</i>	11
2.3.3 Ensaio de Traçador	13
2.3.4 Ensaio de Bombeamento.....	15
2.3.5 Ensaio de Infiltração.....	15
2.3.6 Medição de Nível Freático.....	16
2.4 Análises Laboratoriais.....	16
2.5 Processamento e Avaliação dos Dados	19
CAPÍTULO III – CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS.....	21
3.1 Localização dos Sítios Amostrais.....	21
3.2 Clima.....	24
3.3 Geologia.....	26
3.4 Padrões de Relevo.....	28
3.4.1 Reassentamentos Piabanha I e II	28
3.4.2 Reassentamento Buriti-Piabanha.....	29
3.4.3 Reassentamento Jataí.....	29
3.5 Solos.....	32
3.5.1 Reassentamentos Piabanha I e II	32
3.5.2 Reassentamento Buriti-Piabanha.....	34
3.5.3 Reassentamento Jataí.....	36
3.6 Hidrogeologia.....	38
CAPÍTULO IV – HIDROQUÍMICA.....	42
4.1 Fundamentação Teórica.....	42
4.2 Resultados Analíticos.....	44
4.3 Classificação Hidroquímica.....	52
4.4 Equilíbrio Químico do Sistema.....	57
CAPÍTULO V - MODELO CONCEITUAL DE FLUXO: MECANISMOS DE RECARGA.....	60
5.1 Fundamentação Teórica.....	60
5.2 Hidrodinâmica do Sistema.....	63
5.3 Recarga Natural.....	67
5.4 Avaliação da Eficiência dos Sistemas Pilotos de Recarga Artificial.....	71
CAPÍTULO VI – DISCUSSÕES FINAIS.....	74
CAPÍTULO VII – CONCLUSÕES.....	79
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Localização das áreas de estudo.....	2
Figura 2.1 - Detalhe construtivo da caixa de recarga, antes de seu preenchimento.....	8
Figura 2.2 - Detalhe do preenchimento com cascalho lavado.....	8
Figura 2.3 - Vista geral das estruturas de captação de água de chuva.....	9
Figura 2.4 - Representação esquemática dos pilotos de recarga.....	9
Figura 2.5 - Ilustração de avaliação expedita de Cambissolo Háplico com pedregosidade.....	11
Figura 2.6 - Avaliação expedita do solo e do saprolito durante a instalação das caixas de recarga.....	11
Figura 2.7 - Procedimento de ambientação de frasco para coleta de amostra.....	12
Figura 2.8 - Detalhe de procedimento de medidas para o monitoramento in situ.....	13
Figura 2.9 - Tanque utilizado para transporte da solução usada nos ensaios de traçador.....	14
Figura 2.10 - Detalhe da injeção de solução salina na caixa de recarga.....	14
Figura 2.11 - Ilustração da execução do ensaio de infiltração in situ pelo método <i>open end hole</i>	15
Figura 2.12 - Detalhe do medidor de nível manual elétrico com sensor acústico.....	16
Figura 2.13 - Espectrômetro de Emissão Atômica ICP/AES do LAGEq IG-UnB.....	17
Figura 2.14 - Vista frontal do titulador automático.....	18
Figura 2.15 - Determinação de CO ₂ livre por meio de titulação.....	18
Figura 2.16 - Multiparâmetro portátil da Hach, série Sension.....	19
Figura 2.17 - Critérios para avaliação da recarga natural.....	20
Figura 3.1 - Sítios amostrais (12) no reassentamento Piabanha I, (imagem TM/Landsat - 5).....	21
Figura 3.2 - Sítios amostrais (9) no reassentamento Piabanha - II, (imagem TM/Landsat - 5).....	22
Figura 3.3 - Sítios amostrais (3) no reassentamento Buriti-Piabanha (imagem TM/Landsat - 5).....	22
Figura 3.4 - Sítios amostrais (6) no reassentamento Jataí (imagem TM/Landsat - 5).....	23
Figura 3.5 - Balanço hídrico na Estação Climatológica de Paranã/TO (INMET, 2011).....	25
Figura 3.6 - Contexto geológico regional em escala 1:1.700.000 (Souza, 2008).....	26
Figura 3.7 - Exemplo de perfil litoestratigráfico da área de estudo (adaptado de Vasconcelos, 2009).....	28
Figura 3.9 - Mapa hipsométrico das áreas de estudo.....	30
Figura 3.10 - Mapa de declividade das áreas de estudo.....	31
Figura 3.11 - Mapa pedo-geológico dos reassentamentos Piabanha I e II (adaptado de Campos & Fiori, 2009).....	33
Figura 3.12 - Mapa pedo-geológico do reassentamento Buriti-Piabanha (adaptado de Campos & Fiori, 2009).....	35
Figura 3.13 - Mapa pedo-geológico do reassentamento Jataí (adaptado de Campos & Fiori, 2009).....	37
Figura 3.14 - Representação das diversas formas de água subterrânea (Feitosa & Filho, 2000).....	38
Figura 3.15 - Sistemas aquíferos presentes nas áreas de estudo (adaptado de Campos & Seidel, 2005).....	39
Figura 4.1 - Comportamento das espécies químicas do carbono em relação ao pH (Manaham, 1991).....	43
Figura 4.2 - Variação dos valores de pH em função da época do ano.....	45
Figura 4.3 - Condutividade elétrica nos reassentamentos Piabanha I e II (em $\mu\text{S}/\text{cm}$).....	46
Figura 4.4 - Condutividade elétrica no reassentamento Jataí (em $\mu\text{S}/\text{cm}$).....	46
Figura 4.5 - Condutividade elétrica no reassentamento Buriti-Piabanha (em $\mu\text{S}/\text{cm}$).....	47

Figura 4.6 - Valores médios de pH e CE (em $\mu\text{S}/\text{cm}$) obtidos nos monitoramentos <i>in situ</i>	48
Figura 4.7 - Espacialização das classes de condutividade elétrica dos sítios amostrais.....	49
Figura 4.8 - Teores de cálcio e magnésio durante o período chuvoso.....	50
Figura 4.9 - Teores de cálcio e magnésio durante o período seco.....	50
Figura 4.10 - Variações do íon bicarbonato considerando a sazonalidade climática.....	51
Figura 4.11 - Concentrações médias dos principais íons.....	51
Figura 4.12 - Diagrama de Piper com a classificação das águas durante o período chuvoso (amostras com erro padrão < erro teórico).....	55
Figura 4.13 - Diagrama de Piper com a classificação das águas durante o período seco (amostras com erro padrão < erro teórico).....	56
Figura 4.14 - Diagrama de Eh x pH do sistema Ca-C-S-O-H ($\text{Ca} = 10^{-3}$, $\text{C} = 10^{-3.3}$ e $\text{S} = 10^{-5}$).....	58
Figura 4.15 - Precipitado de calcita (Campos & Fiori, 2009).....	59
Figura 5.1 - Distribuição da umidade na zona vadosa (adaptado de Yeh <i>et al.</i> , 2005).....	62
Figura 5.2 - Variação dos níveis freáticos entre Out/11 e Fev/12.....	64
Figura 5.3 - Curva ajustada para os valores médios de pH entre nov/10 e fev/12.....	65
Figura 5.4 - Modelo hidrodinâmico do sistema aquífero freático-fraturado.....	66
Figura 5.5 - Distribuição aproximada das áreas de recarga.....	67
Figura 5.6 - Modelo conceitual de recarga. Setas pequenas representam a recarga local, setas grandes representam recarga a partir de fluxo regional, com fluxo a partir de áreas elevadas.....	70
Figura 5.7 - representação esquemática da ascensão do nível freático, na forma de cone de ascensão (adaptado de Cadamuro & Campos, 2005).....	72
Figura 5.8 - Modelo de infiltração decorrente da recarga artificial.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Datas de realização das atividades de campo.....	17
Tabela 3.1 - Localização e denominação dos sítios amostrais.....	24
Tabela 4.1 - Análise de Variância (ANOVA) da condutividade elétrica (log) obtida nos monitoramentos.....	47
Tabela 4.2 - Coeficientes de correlação entre a condutividade elétrica e os principais cátions.....	49
Tabela 4.3 - Coeficientes de correlação entre a condutividade elétrica e os principais ânions.....	50
Tabela 4.4 - Coeficientes de correlação dos constituintes principais das águas estudadas.....	52
Tabela 4.5 - Resultados analíticos da primeira campanha (Período Chuvoso).....	53
Tabela 4.6 - Resultados analíticos da segunda campanha (Período Seco).....	54
Tabela 5.1 - Condutividade hidráulica em Neossolo Flúvico – JAT-01.....	63
Tabela 5.2 - Condutividade hidráulica em perfil de Argissolo/Nitossolo – PB II-13.....	63
Tabela 5.3 - Condutividade hidráulica em Latossolo pouco desenvolvido – JAT-04.....	64
Tabela 5.4 - Variação da carga hidráulica (Δh) por tipologia de solo.....	69
Tabela 5.5 - Valores anômalos de elevação do Nível Freático.....	71
Tabela 5.6 - Níveis freáticos decorrentes do cone de ascensão e da dissipação desse fenômeno.....	72
Tabela 5.7 - Comparação dos valores de condutividade elétrica para os sítios que apresentaram anomalias potenciométricas.....	73
Tabela 5.8 - Precipitação acumulada nos períodos 2010/2011 e 2011/2012 até o mês de janeiro.....	73

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

No Brasil o abastecimento de água a partir da exploração de mananciais subterrâneos atinge 57,8% do volume total dos sistemas de abastecimentos públicos, individuais ou domésticos (IBGE, 2004). Para tanto, se faz uso de aquíferos profundos livres ou confinados, com exploração a partir de poços tubulares profundos ou de aquíferos freáticos (rasos), a partir de poços escavados (cisterna, cacimba ou poço amazonas).

Ao mesmo tempo em que a alternativa de utilização da água subterrânea é representativa frente à demanda de abastecimento doméstico, são frequentes os problemas relacionados com a qualidade desse recurso ambiental.

De maneira geral, a qualidade das águas subterrâneas é influenciada pelas condições físico-químicas e composição mineralógica do meio aquífero (solo ou rocha), assim como dos efeitos provocados pela interferência antrópica.

É fato que muitos dos problemas de qualidade das águas subterrâneas, especialmente das freáticas, são decorrentes da adoção de práticas de saneamento *in situ*, representadas, principalmente, pelo emprego de fossas negras ou sistemas sépticos com fossas e sumidouros.

Por outro lado, os aspectos do meio físico exercem um papel fundamental na definição da qualidade dessas águas, uma vez que sua matriz iônica é produto do contato da água pluvial com compostos e materiais diversos existentes na atmosfera, bem como das interações que ocorrem no perfil de infiltração e na zona saturada.

Assim, a qualidade das águas subterrâneas se constitui como uma das principais variáveis ambientais capazes de limitar a utilização do enorme potencial de diversos sistemas aquíferos ou, no mínimo, por requerer a adoção de sistemas de tratamento mais sofisticados.

Segundo Silva *et al.* (1998), os usos cada vez mais competitivos da água exigem a definição de um perfil de qualidade em concordância com seu fim de aplicação. Os aspectos qualitativos das águas subterrâneas tendem a receber maior atenção em regiões economicamente abastadas ou onde essas constituam a principal, senão a única, fonte de abastecimento. Ainda segundo os autores, o estudo da matriz iônica da água é essencial ao planejamento e à sustentabilidade dos diversos usos dos recursos hídricos.

1.2 Localização

As áreas de estudo situam-se ao Sul do estado do Tocantins, compreendendo zonas rurais dos municípios de São Salvador do Tocantins e Paranã (Figura 1.1). Estão inseridas nos domínios de reassentamentos originários do remanejamento de populações atingidas pela implantação do reservatório da Usina Hidrelétrica de Peixe Angical, na bacia hidrográfica do rio Tocantins.

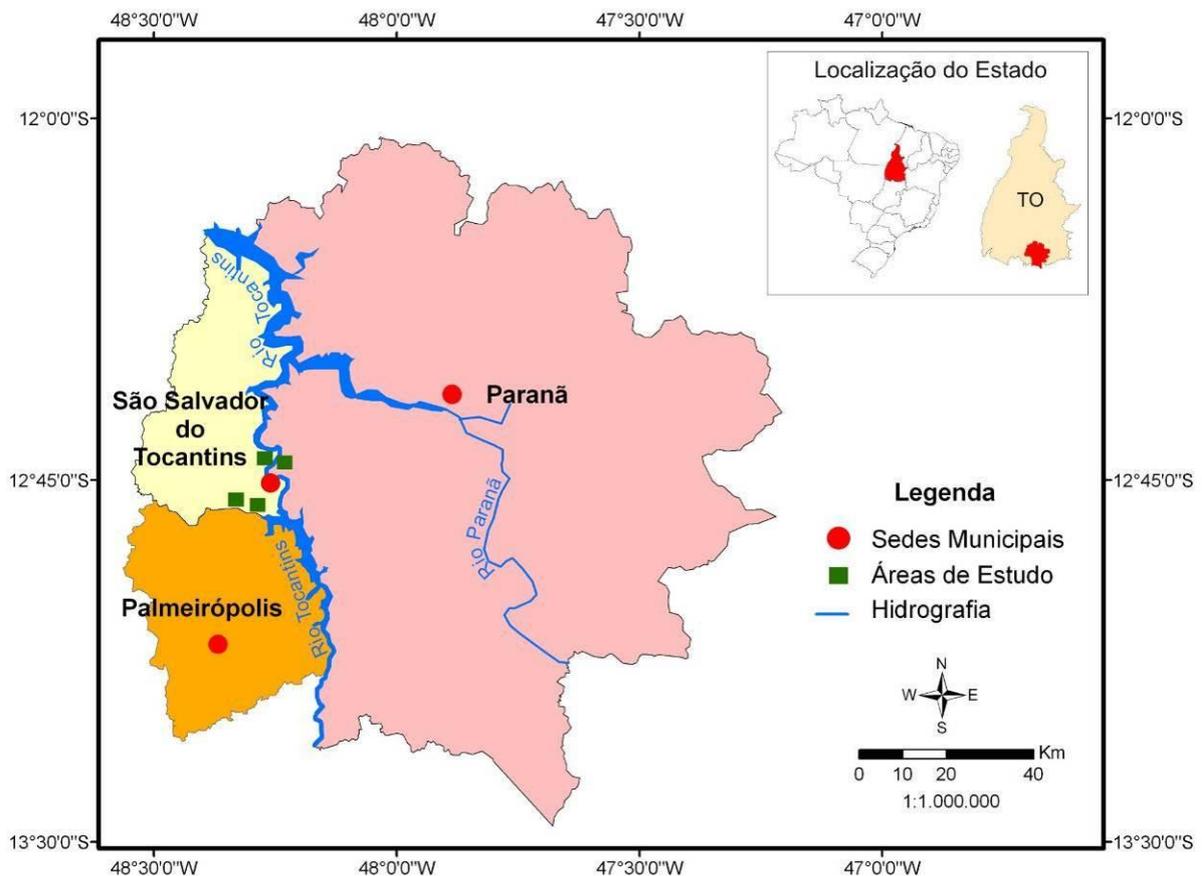


Figura 1.1 – Mapa de localização das áreas de estudo.

A partir de Brasília/DF, o acesso a esses locais se dá por intermédio da rodovia BR-153, até Porangatu, no estado de Goiás, e a partir daí pelas rodovias GO-142 e TO-387, tendo como destino São Salvador do Tocantins. Outra opção é o acesso por meio das rodovias BR-010 e GO-118, em direção a Arraias/TO, seguindo sucessivamente às rodovias BR-242 e TO-296. De São Salvador do Tocantins o acesso aos locais de pesquisa é feito por estradas vicinais e vias secundárias.

1.3 Contextualização do Problema

A região Sul do Tocantins, a exemplo do que ocorre com as demais regiões que integram a bacia hidrográfica do rio Tocantins, apresenta excelente potencial hídrico superficial, fato esse comprovado pelos aproveitamentos hidrelétricos de grande porte que lá foram instalados a partir dos anos 1990, os quais incluem as UHE de Serra da Mesa, Canabrava, São Salvador e Peixe Angical.

O abastecimento doméstico nessa região se dá, predominantemente, pelo aproveitamento de águas subterrâneas, sejam elas provenientes de poços tubulares profundos, ou freáticos. A opção por essa forma de abastecimento é motivada pela disponibilidade das águas subterrâneas e, ainda, pelo fato de que a viabilidade econômica dos sistemas convencionais de abastecimento está comprometida em função dos atuais índices de demanda per capita.

O aproveitamento de águas de aquíferos profundos ou rasos, em geral, também é influenciado por variáveis econômicas, de forma que populações de mais baixa renda e desprovidas de sistema público de abastecimento ficam restritas à opção de menor custo, ou seja, captação de águas freáticas, por meio de poços escavados (cisternas ou cacimbas).

Ao contrário do que é observado com a disponibilidade quantitativa, a qualidade físico-química de algumas águas subterrâneas da região estudada tem se constituído em desafios na estruturação de sistemas de abastecimento. Um exemplo disto é a problemática de abastecimento vivenciada em reassentamentos nos municípios de São Salvador do Tocantins/TO e Paranã/TO. Esses reassentamentos decorreram da necessidade de realocação de pessoas atingidas pela implantação da Usina Hidrelétrica de Peixe Angical.

Originalmente dotados de sistemas de abastecimento baseados em poços freáticos, alguns dos lotes que integram os reassentamentos Piabanha I e II, Buriti-Piabanha e Jataí apresentam águas freáticas caracterizadas por elevado total de sais dissolvidos, com consequente rejeição por parte dos usuários.

Numa tentativa de minimizar esses problemas, que acabaram se traduzindo em impacto ambiental (CONAMA, 1986; Sánchez, 2008), o consórcio responsável pela Usina Hidrelétrica de Peixe Angical implantou, entre dezembro de 2010 e janeiro de 2011, estruturas piloto de recarga artificial que integravam propostas desenvolvidas por Campos & Fiori (2009) para gestão do sistema de abastecimento de água. Tais estruturas se basearam em mecanismos de indução dos processos de infiltração das águas de chuva, e que visavam à diminuição dos Sólidos Dissolvidos Totais - TDS (*Total Dissolved Solids* - APHA, 1998) das águas freáticas.

A presente pesquisa visava, inicialmente, à avaliação da funcionalidade dessas estruturas de recarga com base em dados de análises e monitoramentos hidroquímicos. Ocorre

que os resultados preliminares pouco favoráveis indicaram a existência de complexos mecanismos de movimentação de água na zona vadosa e de fluxo na zona saturada. Além disso, demonstraram que a interação com o meio físico não apenas era responsável pela definição da matriz iônica daquelas águas, mas também pelas condições de equilíbrio hidroquímico lá existentes.

Tendo em vista a importância do conhecimento da matriz iônica da água para o planejamento dos diversos usos dos recursos hídricos (Silva, 1998), os processos geoquímicos existentes nos sistemas aquíferos da região, assim como as notáveis interações entre a água subterrânea e os ambientes pedo-geológicos, a pesquisa foi reajustada de maneira a viabilizar:

- O necessário entendimento a respeito dos mecanismos de infiltração e recarga;
- As condições de fluxo subterrâneo; e
- O comportamento hidroquímico no ambiente freático.

1.4 Objetivos

O objetivo principal desta dissertação de mestrado é avaliar as formas de recarga natural e o comportamento da estabilidade química das águas dos aquíferos freáticos associados aos regolitos rasos, na região Sul do Estado do Tocantins.

Os objetivos específicos são voltados à proposição de um modelo conceitual de fluxo hidrodinâmico para a região, com base em parâmetros dimensionais dos aquíferos; à classificação hidroquímica das águas freáticas; à definição das causas da salinização das águas; e a avaliação da eficiência das estações pilotos de recarga artificial.

1.5 Justificativas

O aprofundamento do conhecimento sobre as formas de recarga natural dos aquíferos, assim como sobre as interações com o solo e geologia local durante os processos de infiltração e movimentação da água em subsuperfície, é essencial para o estabelecimento de sistemas mais eficientes de manejo e utilização das águas freáticas da região.

As iniciativas de solução adotadas para o problema de abastecimento de água nas propriedades rurais da área de estudo, materializadas pela instalação de diversos sistemas de recarga artificial, foram confrontadas com a carência de dados técnicos mais aprimorados, tais como condutividade hidráulica das distintas classes de solo existentes na área de estudo, diversidade petrográfica e processos geoquímicos.

Embora tenha havido tentativa de aplicação de modelos de recarga pré-existentes, há de se considerar que a heterogeneidade petrográfica, associada à cobertura de solos, em geral, pouco desenvolvida, confere certa particularidade hidrogeológica à região, o que justifica a

tentativa de obtenção de um modelo conceitual próprio para os mecanismos de recarga e fluxo subterrâneo.

A justificativa técnico-científica do presente trabalho decorre, portanto, da atual carência de pesquisas em água subterrânea e de conhecimento sobre os parâmetros hidrodinâmicos das áreas estudadas, que sejam capazes de sustentar, adequadamente, eventuais ações de aproveitamento e manejo dos aquíferos da região considerada.

CAPÍTULO II

MATERIAIS E MÉTODOS

Os estudos foram desenvolvidos em estruturas previamente instaladas, constituídas de 30 poços freáticos, do tipo cisterna, dos quais 29 são acompanhados dos respectivos sistemas de recarga artificial.

Sob o ponto de vista metodológico, a pesquisa envolveu um conjunto de atividades, conforme descrição a seguir:

- 1- Implantação dos sistemas pilotos de recarga artificial, cuja execução ficou a cargo do consórcio responsável pela Usina Hidrelétrica de Peixe Angical.
- 2- Caracterização da geologia da área de estudo, com base em mapeamentos existentes e observações de campo. Refinamento das informações sobre petrografia macroscópica e estratigrafia, com base em registros obtidos durante serviços de perfuração de poços tubulares profundos nos reassentamentos, além da observação de afloramentos rochosos.
- 3- Caracterização do saprolito, por meio de observações em taludes provenientes de cortes e de inspeções nas escavações destinadas às caixas de recarga, e caracterização da pedologia, com base em dados contidos em relatórios técnicos existentes, complementados com visitas a campo destinadas à avaliação de horizontes diagnósticos. Essa etapa pretende mostrar a importância do regolito nos processos de mineralização das águas.
- 4- Caracterização do relevo, por meio de modelo digital do terreno e observações de campo para auxiliar na determinação dos sistemas de fluxo e das áreas de recarga / descarga.
- 5- Avaliação da condutividade hidráulica dos solos em diferentes profundidades, com base em estudos preexistentes e realização de ensaios complementares. Avaliação da transmissividade dos aquíferos por meio de dados provenientes de testes de bombeamento. Esses dados deverão auxiliar na determinação do modelo conceitual de fluxo.
- 6- Avaliação expedita das áreas com potencial de recarga natural, com base nos condicionantes de meio físico, visando à delimitação dos locais com afinidades para ocorrência dos processos de recarga natural.

- 7- Medição das variações dos níveis potenciométricos nos poços freáticos com auxílio de medidor manual, no intuito de avaliar o menor nível, de período seco, e a ascensão durante o período chuvoso. Essa informação será utilizada para a determinação das variações nas cargas hidráulicas e avaliação da efetividade dos pilotos de recarga.
- 8- Monitoramento dos poços com medição *in situ* e periodicidade mensal a trimestral, objetivando a avaliação dos parâmetros: pH, temperatura e condutividade elétrica. Esse banco de dados será útil para se verificar a efetividade qualitativa dos sistemas pilotos de recarga.
- 9- Caracterização hidroquímica das águas freáticas, realizada no período chuvoso e seco, por meio do procedimento de análise físico-química, considerando os seguintes parâmetros: pH, condutividade elétrica, cálcio, magnésio, ferro, silício, alumínio, sódio, potássio, flúor, cloro, nitrato, sulfato, alcalinidade em bicarbonato e gás carbônico dissolvido. Esses dados serão utilizados para a classificação hidroquímica das águas, com auxílio do Diagrama de Piper e para se verificar eventual mudança da qualidade das águas em virtude da sazonalidade climática ou dos mecanismos de indução de infiltração por meio dos sistemas piloto de recarga artificial.
- 10- Realização de testes estatísticos nos dados obtidos dos monitoramentos, no intuito de auxiliar as interpretações sobre os comportamentos dos parâmetros analisados, considerada a sazonalidade.
- 11- Proposição de modelo hidrodinâmico dos sistemas estudados e de modelo de recarga natural, tendo como base os condicionantes do meio físico e os resultados dos monitoramentos dos poços/sistemas piloto de recarga artificial, assim como dos ensaios e testes.
- 12- Avaliação da efetividade dos pilotos de recarga, utilizando-se de dados de precipitação, áreas de captação e monitoramento de níveis e de parâmetros qualitativos das águas freáticas.

2.1 O Sistema de Recarga Artificial - Sistema Piloto de Recarga

O sistema piloto de recarga artificial teve como premissa a indução da infiltração das águas de chuva através de caixas de recarga nas proximidades dos poços de abastecimento, sendo constituído por:

- Poço de captação de água freática, com um metro de diâmetro, profundidades variadas e revestimento das paredes com anéis de manilha;

- Caixas de recarga em formato cilíndrico, instaladas na zona vadosa próxima ao poço de captação, medindo dois metros de profundidade e um metro de diâmetro, sendo, ainda, preenchidas com cascalho lavado, revestidas na poção superior com anel de manilha (Figuras 2.1 e 2.2) e cobertas com tampa de concreto;
- Calhas coletoras em PVC, instaladas nos beirais dos telhados das residências (Figura 2.3); e
- Tubulação em PVC, para interligação das calhas coletoras com os poços de infiltração.



Figura 2.1 - Detalhe construtivo da caixa de recarga, antes de seu preenchimento.



Figura 2.2 - Detalhe do preenchimento com cascalho lavado.



Figura 2.3 – Vista geral das estruturas de captação de água de chuva.

A Figura 2.4 ilustra a concepção das estruturas que compõem os sistemas de recarga piloto, assim como o posicionamento desses em relação aos poços de captação de água freática.

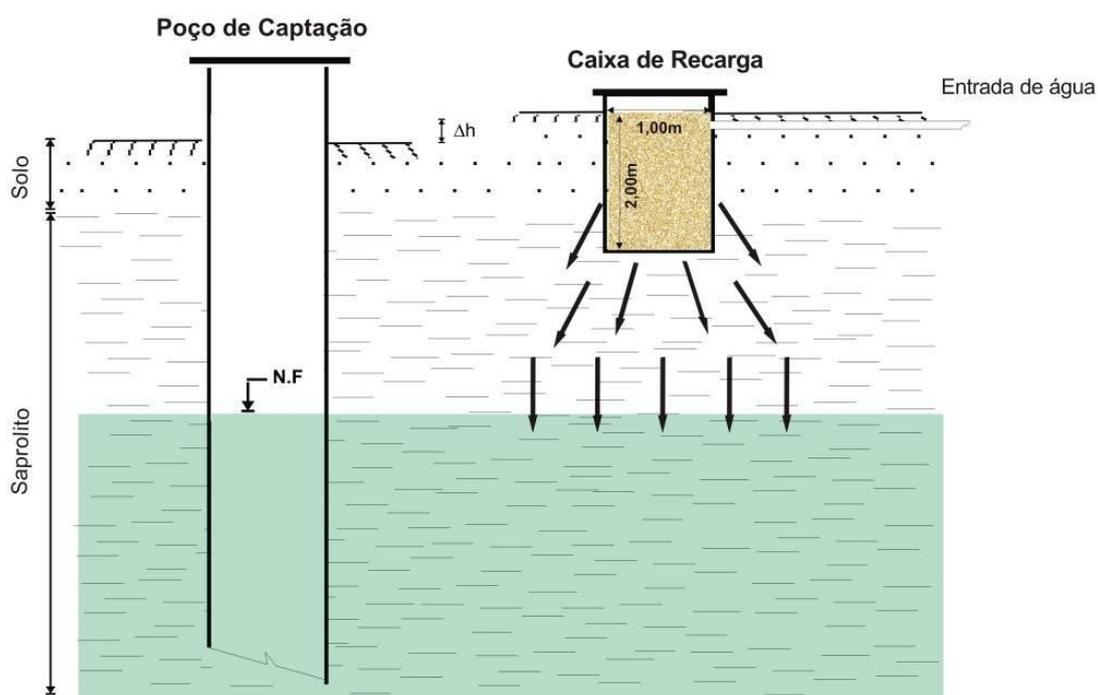


Figura 2.4 - Representação esquemática dos pilotos de recarga.

No Anexo II (Dados Gerais das Unidades Amostrais) são registradas a distância entre a caixa de recarga e o poço, dimensão das áreas de captação, classificação das caixas de recarga em função dos gradientes hidráulicos, assim como indicadas as tipologias de solo dos locais de instalação.

2.2 Levantamento de Informações Preexistentes

Essa etapa compreendeu as consultas a informações preexistentes relativas à geomorfologia, geologia, hidrogeologia, pedologia, clima e uso/ocupação do solo. As informações foram obtidas de mapas em escalas variáveis de 1:100.000 até 1:10.000 em alguns casos.

As principais fontes de consulta foram estudos e relatórios técnicos desenvolvidos em função dos desdobramentos do Projeto Básico Ambiental - PBA, decorrentes do licenciamento ambiental da Usina Hidrelétrica de Peixe Angical, assim como em pesquisas científicas (dissertações de mestrado) já desenvolvidas nas proximidades das áreas de estudo.

Originalmente foram obtidos dados meteorológicos dos boletins da estação meteorológica da Usina Hidrelétrica de Peixe Angical. Em razão da distância de mais de 60 km entre as áreas de estudo e essa estação, optou-se em utilizar dados locais, registrados manualmente por meio de pluviômetro instalado nos domínios da propriedade rural identificada como Lote 04 do reassentamento Jataí.

2.3 Etapas de Campo

As atividades de campo podem ser agrupadas em duas etapas, a saber: reconhecimento das condições de meio físico e coleta de dados.

A primeira etapa, realizada entre novembro e dezembro de 2010, visou ao reconhecimento das condições de meio físico da área de estudo. Essa etapa envolveu, ainda, a mensuração e caracterização das estruturas de recarga artificial.

A segunda etapa teve início simultaneamente à primeira, ou seja, em novembro de 2010, no entanto, se estendeu até fevereiro de 2012. Constituíram procedimentos dessa etapa: amostragem de água para fins de monitoramento físico-químico *in situ*, e análises laboratoriais, realização de ensaios de traçador e realização de ensaios de bombeamento.

2.3.1 Reconhecimento da Área de Estudo

O procedimento de reconhecimento objetivou a caracterização geológica e pedológica das áreas de estudo (Figura 2.5). Para tanto, confrontou-se os resultados de observação em campo (observação tátil-visual) com os dados e informações preexistentes.



Figura 2.5 - Ilustração de avaliação expedita de Cambissolo Háplico com pedregosidade.

As medições das dimensões das estruturas de captação de água de chuva (áreas de coberturas) foram realizadas com auxílio de trena por meio de medição direta.

O mesmo ocorreu com a avaliação das estruturas de recarga (caixas de recarga), onde foram verificadas: a profundidade da estrutura, o diâmetro, o preenchimento com cascalho lavado e a distância, em projeção horizontal, até o poço de abastecimento (Figura 2.6). Além desses aspectos também foram verificadas as características do solo e do saprolito.



Figura 2.6 - Avaliação expedita do solo e do saprolito durante a instalação das caixas de recarga.

A observação dos padrões de relevo também foi objeto dessa etapa, buscando-se assim uma melhor interpretação do gradiente hidráulico do aquífero freático existente nas áreas.

2.3.2 Amostragens e Monitoramento *in situ*

As amostragens de água foram realizadas diretamente nos poços de captação, utilizando-se da estrutura de bombeamento existente.

Considerando que a confiabilidade dos resultados finais depende da correta execução dos procedimentos de amostragem primou-se pela adoção das recomendações padrões para amostragem de água, cabendo destaque para: utilização de frascos de coleta apropriados e desprovidos de qualquer contaminação; descarte das primeiras águas provenientes de bombeamento, de modo a minimizar efeitos de variações da composição em função da água retida na tubulação; e emprego da prática de ambientação dos frascos, a partir de lavagens sucessivas com a própria água a ser amostrada (Figura 2.7).

O monitoramento *in situ* compreendeu a medições dos valores de temperatura, pH e condutividade elétrica. Para tanto, utilizou-se aproximadamente 100 ml de cada amostra em Becker, fazendo-se leitura imediata por meio do equipamento pH Meter SHOTT GERATECG813 e Conductivity/TDS meter da Hach Company CO-150 (Figura 2.8).

Para determinação do pH o aparelho era previamente calibrado com soluções padrão 4, 7 e 10. Para condutividade elétrica a calibração era realizada por meio de solução padrão correspondente a $1000\mu\text{S}/\text{cm}$ e a correção em função da temperatura se deu automaticamente a partir de alinhamento do próprio aparelho.



Figura 2.7 - Procedimento de ambientação de frasco para coleta de amostra.



Figura 2.8 - Detalhe de procedimento de medidas para o monitoramento *in situ*.

Visando preservar a qualidade das amostras que se destinavam às análises laboratoriais, foram adotados os seguintes cuidados: acondicionamento em frascos apropriados; manutenção em caixas térmicas sob condições refrigeradas; e entrega no laboratório em prazo inferior a 24 horas.

2.3.3 Ensaios de Traçador

Tendo-se como fundamento o fato de que o transporte de solutos nas águas subterrâneas corresponde à direção e a velocidade do fluxo (Käss, 1998), foram realizados ensaios de traçador em dois sítios de amostragem. Em função de condições logísticas foram escolhidos os lotes 01 e 04 do Reassentamento Jataí.

Esses ensaios também tiveram a finalidade de verificar a ocorrência de possíveis perdas das águas de recarga por espalhamento no solo ou por interfluxo, decorrentes de diferenças na condutividade hidráulica no perfil do *solum* e das direções de traços de fraturas impressos em saprolitos,

Para a execução dos ensaios foram utilizados, em cada ensaio, 2500 litros de solução salina preparada a partir de 60 kg de NaCl de uso pecuário. A solução foi preparada em tanque metálico transportado por trator e injetada diretamente nas caixas de recarga (Figura 2.9 e Figura 2.10).

No Lote 01 o ponto de injeção fica a 2,72 metros da cisterna em que o monitoramento é realizado e no Lote 04 a caixa de injeção está situada a 3,75 metros da cisterna. O nível estático do poço no lote 01 era de 2,6 metros e no Lote 05 era de 4,5 metros.



Figura 2.9 - Tanque utilizado para transporte da solução usada nos ensaios de traçador.



Figura 2.10 - Detalhe da injeção de solução salina na caixa de recarga.

A solução salina empregada foi preparada de maneira a assegurar uma condutividade elétrica superior a 30.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. A partir do procedimento de injeção, realizou-se o monitoramento durante 36 horas.

2.3.4 Testes de Bombeamento

Com o intuito de avaliar a capacidade de recuperação do nível potenciométrico e, conseqüentemente, relacionar essa recuperação com os parâmetros hidrodinâmicos do aquífero, foram executados testes de bombeamento em três locais distintos, sendo que dois deles foram coincidentes com locais de realização dos ensaios de traçadores. Referido bombeamento foi executado com auxílio de bomba elétrica de 0,5 CV de potência, com vazão nominal de 1000 litros/hora, e funcionamento permanente até o significativo rebaixamento da coluna d'água. Na seqüência, seguiu-se com o monitoramento de recuperação do nível potenciométrico.

Para a obtenção dos valores de transmissividade foi utilizado o software *Aquifer Test* versão 4.2 da *Waterloo Hydrogeologic*. Foi aplicado o método de Neuman para aquíferos livres, com ajuste automático da curva de campo com a curva padrão.

2.3.5 Ensaios de Infiltração

Complementarmente aos dados de infiltração obtidos em estudos pré-existentes, foram realizados quatro ensaios de infiltração, cujas escolhas dos locais levaram em conta os padrões pedológicos e a topografia. Dois desses ensaios coincidiram com os locais onde foram desenvolvidos os ensaios de traçadores e testes de bombeamento.

Esses procedimentos, realizados pelo método “*open end hole*” (Figura 2.11), permitiram a estimativa da condutividade hidráulica vertical (k_v) em profundidades variáveis de 0,3 a 1,40 metros.



Figura 2.11 - Ilustração da execução do ensaio de infiltração *in situ* pelo método *open end hole*.

2.3.6 Medição de Nível Freático

As oscilações do Nível Freático também foram avaliadas com o emprego de medidor de nível com sensor elétrico (Figura 2.12).

Tais medidas tiveram início no mês de setembro de 2011 e se estenderam até janeiro de 2012. Como os níveis mais baixos foram observados durante as medições realizadas em outubro, esse mês foi adotado como referência para as avaliações de ascensão observadas nos meses seguintes.

Dos 30 poços objetos de medição, 14 não apresentavam qualquer tipo de uso consuntivo. Para os 16 restantes, tomou-se o cuidado de efetuar as medições com um mínimo de 8 horas após eventual processo de bombeamento.



Figura 2.12 - Detalhe do medidor de nível elétrico/manual com sensor acústico.

A Tabela 2.1 apresenta a consolidação das atividades de campo, bem como os respectivos períodos de realização.

2.4 Análises Laboratoriais

As análises laboratoriais foram realizadas pelo Laboratório de Geoquímica da Universidade de Brasília - LaGeq, logo após a recepção das amostras.

Todas as metodologias utilizadas nas análises químicas foram baseadas no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*; edição da American Public Health Association (APHA), da American Water Works Association (AWWA), e da Water Pollution Control Federation (WPCF).

Tabela 2.1 – Datas de realização das atividades de campo.

Período	Natureza da Atividade
19 a 20 de novembro de 2010	Reconhecimento e monitoramentos
11 a 12 de dezembro de 2010	Reconhecimento e monitoramentos
13 a 14 de fevereiro de 2011	Monitoramentos e amostragens para análises laboratoriais
18 a 19 de março de 2011	Monitoramentos
29 a 30 de abril de 2011	Monitoramentos
28 a 29 de maio 2011	Monitoramentos e ensaios
23 a 26 de setembro de 2011	Monitoramentos e amostragem para análises laboratoriais
27 a 30 de outubro de 2011	Monitoramentos, ensaios e medição de nível freático
01 a 03 de dezembro de 2011	Monitoramentos e medição de nível freático
06 a 08 de janeiro de 2012	Monitoramentos e medição de nível freático
02 a 03 de fevereiro de 2012	Monitoramentos e medição de nível freático

Para análise de sódio (589,00nm) e potássio (766,49nm) foi utilizado o Espectrofotômetro de Absorção Atômica (EAA), da marca Perkin Elmer, modelo *Analyst 200*. Como fonte de excitação foi utilizada chama de ar-acetileno.

As análises de cálcio (317,93nm), magnésio (279,88nm), ferro (259,95nm), silício (251,61nm), alumínio (308,21nm), foram realizadas no Espectrômetro de Emissão Atômica com Plasma indutivamente acoplado (ICP/AES) marca PERKIN ELMER, modelo Spectroflame-Fvmo3, utilizando nebulizador Meinhard (Figura 2.13).



Figura 2.13 - Espectrômetro de Emissão Atômica ICP/AES do LAGEq IG-UnB.

Os ânions flúor, cloro nitrato e sulfato foram determinados por cromatógrafo iônico (IC) com condutividade suprimida da marca Dionex, modelo ICS90. A alcalinidade foi

determinada por método titulométrico de análise com H_2SO_4 0,002 N padronizado com NaOH 0,005 N, utilizando um titulador automático da marca Schott, modelo *TitroLine easy* (Figura 2.14).

As curvas de calibração do EAA, ICP e IC foram preparadas com soluções padrões de 1000 ppm da marca Vetec e, a partir delas, foram feitas as diluições necessárias para cada elemento.



Figura 2.14 - Vista frontal do titulador automático.

A determinação do CO_2 livre se deu por meio de titulação com Na_2CO_3 0,04 N e indicador fenolftaleína (Figura 2.15).



Figura 2.15 - Determinação de CO_2 livre por meio de titulação.

O pH foi determinado utilizando um multiparâmetro portátil da Hach, série Sension (Figura 2.16).



Figura 2.16 - Multiparâmetro portátil da Hach, série Sension.

Os valores de condutividade elétrica foram obtidos anteriormente à remessa das amostras para o laboratório, ou seja, no momento da coleta das amostras. Para tanto, utilizou-se do equipamento pH Meter SHOTT GERATECG813 e Conductivity/TDS meter da Hach Company CO-150.

2.5 Processamento e Avaliação dos Dados

Os dados obtidos por meio do monitoramento hidroquímico e das análises laboratoriais foram sistematizados na forma de planilhas do software Excel 2007, da Microsoft.

As análises estatísticas realizadas sobre esses dados compreenderam, fundamentalmente, média simples, teste de hipótese, análise de variância (ANOVA) e distribuição de frequência. Os testes de hipótese e as análises de variância se deram sobre a conversão dos dados brutos em logarítmicos, no intuito da obtenção de distribuições do tipo “lognormal” (Pinheiro *et al.*, 2009; Andriotti, 2005; Bisquerra *et al.*, 2004). Todos esses procedimentos foram desenvolvidos no modo “ferramentas de análise” do mesmo software Excel 2007.

Também foi utilizada a técnica de espacialização das informações, disponível no modo “*classified post*” do software Surfer.

A classificação das águas subterrâneas foi realizada empregando-se a metodologia do Diagrama de Piper, utilizando, para tanto o software Qualigraf, da Fundação Cearense de Meteorologia - FUNCEME.

O software Excel 2007 também foi empregado para o processamento dos dados relativos aos ensaios de infiltração. Já os resultados dos testes de bombeamento foram avaliados com auxílio do software Aquifer Test. Nesse caso foi usado o método de Neuman para aquíferos livres, com os seguintes parâmetros: espessura saturada de 30 metros, aquífero heterogêneo e isotrópico.

O potencial de recarga natural teve como base a consideração das favorabilidades relacionadas ao relevo, pedologia, e litologia. Mesmo sendo caracterizada como uma avaliação expedita e aproximada e, ainda, que não tenha levado em conta condicionantes como cobertura vegetal e clima, possibilitou a identificação dos locais com maior afinidade para a ocorrência dos processos de recarga natural.

As avaliações relacionadas aos mecanismos de fluxo, comportamento da recarga natural e eficiência das estruturas piloto de recarga artificial foram fundamentadas nas características químicas das águas subterrâneas, em avaliações potenciométricas, nos padrões petrográficos locais e na tipologia de solos. Nessas avaliações também foram consideradas as estimativas de perdas por espalhamento no solo e interfluxo, as quais foram feitas com base nos conhecimentos relativos ao padrão estrutural das rochas presentes nas áreas de estudo e nos valores de condutividade hidráulica obtidos para os diferentes tipos de solos.

A Figura 2.17 sintetiza os critérios técnicos utilizados para a proposição do modelo conceitual de recarga natural nas áreas de estudo.

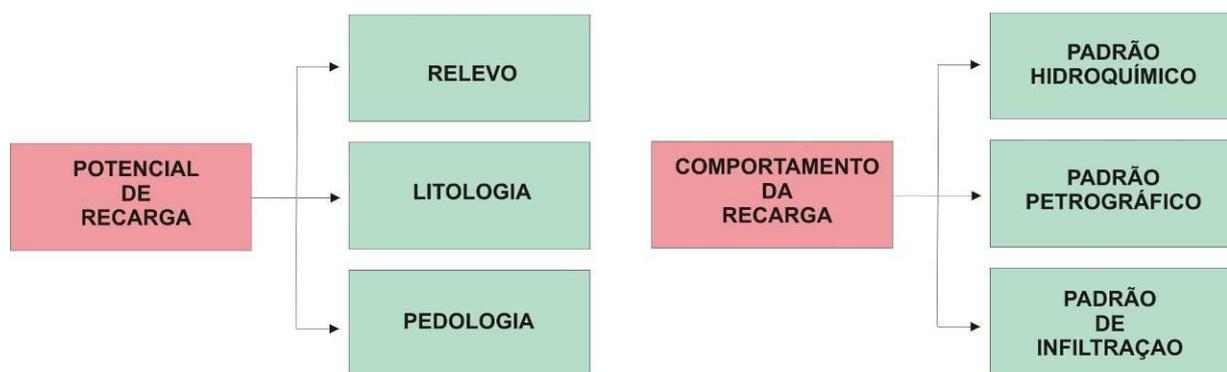


Figura 2.17 - Critérios para avaliação da recarga natural.

CAPÍTULO III

CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS

3.1 Localização dos Sítios Amostrais

Conforme mencionado, as áreas de estudo compreendem alguns dos lotes que integram os reassentamentos rurais Piabanha I e II, Buriti-Piabanha e Jataí, decorrentes da implantação da Usina Hidrelétrica de Peixe Angical, e localizados nos municípios de São Salvador do Tocantins/TO e Paranã/TO.

Os sítios amostrais, 30 ao todo, são representados por poços freáticos que integram os sistemas pilotos de recarga implantados nesses reassentamentos.

No reassentamento Piabanha - I foram utilizadas doze estruturas, as quais estão distribuídas nos lotes 01, 02, 03, 05, 06, 10, 11, 12, 13, 20, 21 e 27 (Figura 3.1).

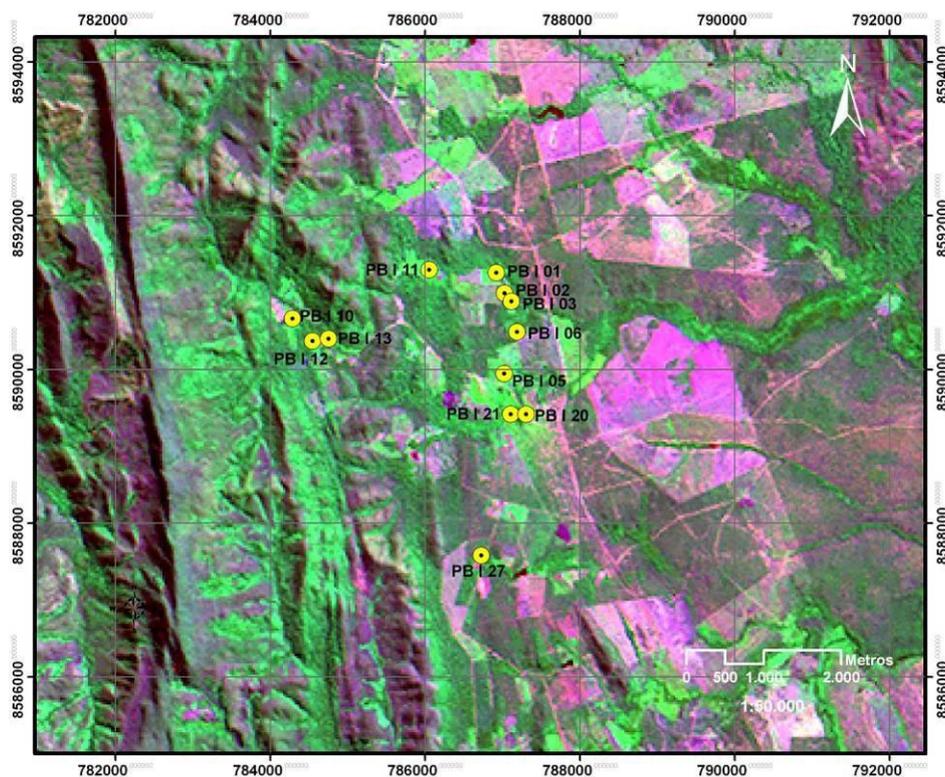


Figura 3.1 - Sítios amostrais (12) no reassentamento Piabanha I, (Imagem TM/Landsat -5).

Os sítios amostrais do reassentamento Piabanha - II são compostos pelos poços localizados nos lotes 01, 02, 03, 05, 10, 11, 12, 13 e 19 (Figura 3.2).

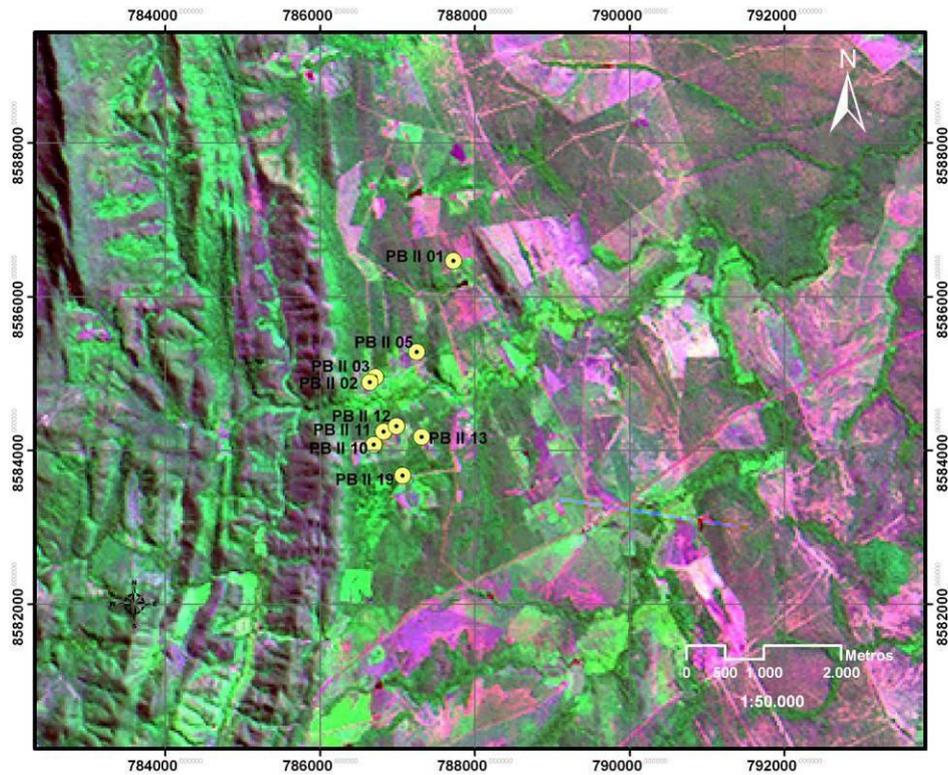


Figura 3.2 - Sítios amostrais (9) no reassentamento Piabanha - II, (Imagem TM/Landsat -5).

No reassentamento Buriti-Piabanha foram investigados os poços localizados nos lotes 02, 11 e 14 (Figura 3.3).

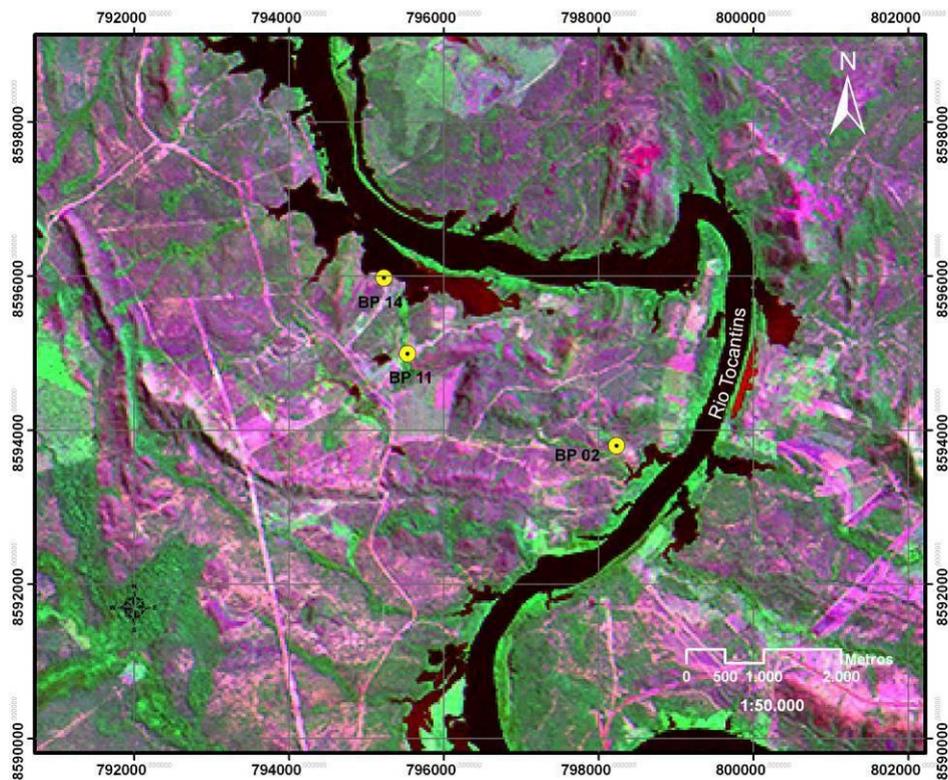


Figura 3.3 - Sítios amostrais (3) no reassentamento Buriti-Piabanha (Imagem TM/Landsat -5).

O conjunto amostral compreendido pelo reassentamento Jataí constitui-se de seis poços localizados nos lotes 01, 02, 03, 04, 07 e 13. Ao contrário das demais unidades, essa não se localiza no município de São Salvador do Tocantins/TO, mas em Paranã/TO (Figura 3.4).

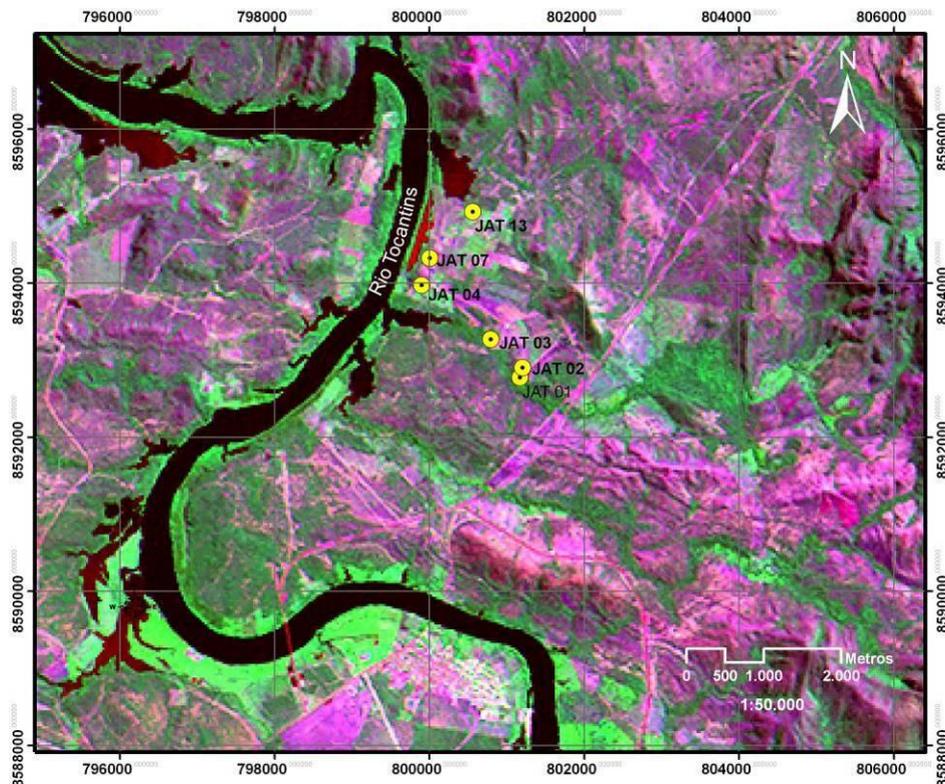


Figura 3.4 - Sítios amostrais (6) no reassentamento Jataí (Imagem TM/Landsat -5).

Consideradas as dimensões médias dos lotes onde estão dispostos os sítios amostrais, a área de estudo compreende, aproximadamente, 20 km², os quais se distribuem numa área total de cerca de 70 km².

A Tabela 3.1 consolida as informações relacionadas à localização de cada um dos sítios amostrais em relação às coordenadas planares UTM (Datum SAD 69), aos reassentamentos e aos respectivos lotes rurais.

Tabela 3.1 - Localização e denominação dos sítios amostrais.

UTM - 22L	UTM - N	Código	Reassentamento	Lote	Denominação do Sítio Amostral
786692	8584078	1	Piabanha II	10	PB II -10
786817	8584248	2	Piabanha II	11	PB II -11
786984	8584318	3	Piabanha II	12	PB II -12
787062	8583673	4	Piabanha II	19	PB II -19
787307	8584178	5	Piabanha II	13	PB II -13
787244	8585282	6	Piabanha II	05	PB II -05
787719	8586468	7	Piabanha II	01	PB II -01
786640	8584890	8	Piabanha II	02	PB II -02
786712	8584956	9	Piabanha II	03	PB II -03
786721	8587580	10	Piabanha I	27	PB I - 27
787102	8589418	11	Piabanha I	20	PB I - 20
787301	8589418	12	Piabanha I	21	PB I - 21
787017	8589948	13	Piabanha I	05	PB I - 05
786050	8591300	14	Piabanha I	11	PB I - 11
784285	8590664	15	Piabanha I	10	PB I - 10
784540	8590372	16	Piabanha I	12	PB I - 12
784749	8590402	17	Piabanha I	13	PB I - 13
787184	8590490	18	Piabanha I	06	PB I - 06
786918	8591262	19	Piabanha I	01	PB I - 01
787022	8590994	20	Piabanha I	02	PB I - 02
787114	8590886	21	Piabanha I	03	PB I - 03
795523	8595004	22	Buriti-Piabanha	14	BP - 14
795530	8594996	23	Buriti-Piabanha	11	BP - 11
798229	8593802	24	Buriti-Piabanha	02	BP - 02
801165	8592780	25	Jataí	01	JAT - 01
801202	8592906	26	Jataí	02	JAT - 02
800791	8593274	27	Jataí	03	JAT - 03
800003	8594330	28	Jataí	07	JAT - 07
800558	8594930	29	Jataí	13	JAT - 13
799898	8593976	30	Jataí	04	JAT - 04

3.2 Clima

Predomina nas áreas de estudo o clima tropical úmido, classificado como Cw, de acordo Köpen. Semelhantemente ao que ocorre no Cerrado do centro-oeste, a região em que se inserem as áreas em estudo apresenta forte sazonalidade, com duas estações contrastantes.

O período seco se estende de maio a setembro, chegando a apresentar total ausência de chuvas, e sendo caracterizado por baixa nebulosidade e reduzidos índices de umidade relativa do ar.

O período chuvoso se dá de outubro a abril, sendo que as precipitações anuais não ultrapassam 1500 mm. Os maiores volumes de chuva ocorrem de dezembro a março.

A região também é caracterizada pela variabilidade temporal das chuvas, a qual é influenciada pela circulação de massas de ar e por fenômenos climáticos globais. Fundamentalmente, as chuvas são controladas por massas de ar úmido provenientes da região amazônica e, eventualmente, por frentes frias originárias do sul do continente.

A Normal Climatológica para a região indica temperatura média anual de 27°C, média mínima de 21°C e média máxima de 33°C (INMET, 2011).

A evaporação tende a ser mais elevada no período seco, ultrapassando os 120 mm/mês, o que contribui para o agravamento da condição de déficit hídrico. A evapotranspiração potencial anual na região é da ordem de 1250 mm (THEMAG, 2000).

Em razão da grande continentalidade da região, é comum a observação de extremos climáticos, tais como, extensão do período seco, temperaturas superiores a 34°C, precipitações com intensidades anômalas (> 80 mm/dia) e predomínio de calmarias atmosféricas nos relevos caracterizados como depressões (THEMAG, 2000).

O balanço hídrico da região (Figura 3.5), de acordo com a normal climatológica 1961-1990 (INMET, 2011), demonstra a condição de déficit no período seco e de reposição apenas nos meses de novembro e dezembro.

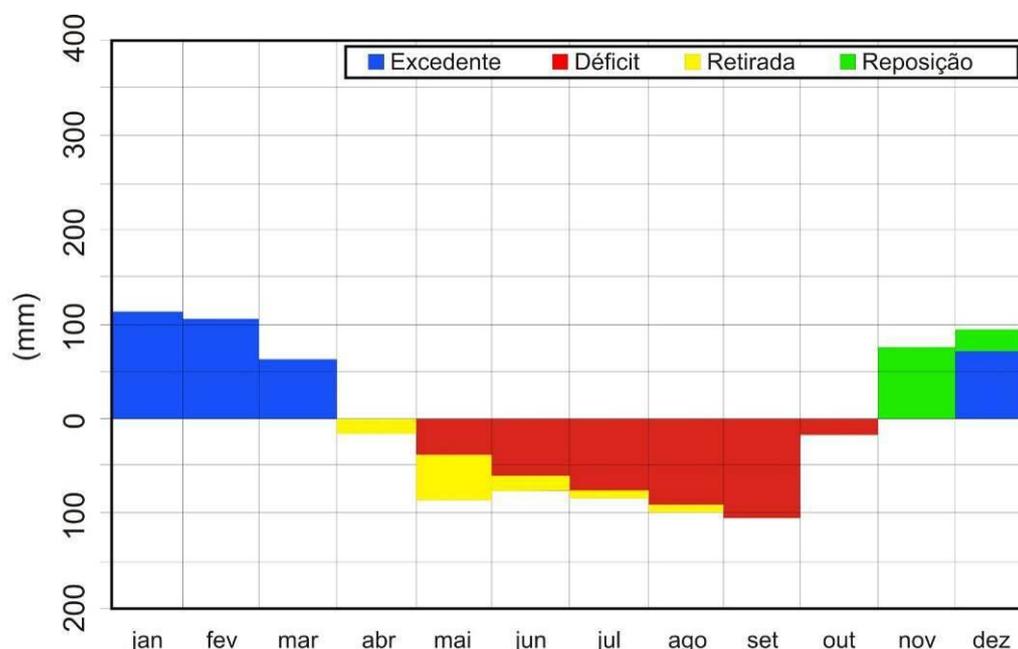


Figura 3.5 - Balanço hídrico na Estação Climatológica de Paranã/TO (INMET, 2011).

3.3 Geologia

Quanto ao contexto geológico, as áreas compreendem parte da porção setentrional da Faixa de Dobramento Brasília, com evolução no neoproterozóico, com envolvimento parcial do embasamento granito-gnáissico paleoproterozóico na deformação regional. As rochas supracrustais são correlacionáveis aos grupos Araí e Serra da Mesa, além da Sequência Meta Vulcanossedimentar de Palmeirópolis. O embasamento é associado à Suíte Aurumina (Shobbenhaus *et al.*, 1984; Dardenne 2000, Alvarenga *et al.* 2006; Botelho *et al.* 2006).

Na Figura 3.6 (Souza, 2008) é apresentado o contexto geológico regional. Em razão da escala adotada para o mapa (1:1.700.000) não se visualiza a Sequência Meta Vulcanossedimentar de Palmeirópolis, que atinge pequena faixa ao sul do município de São Salvador do Tocantins, entre os Grupos Serra da Mesa e Araí.

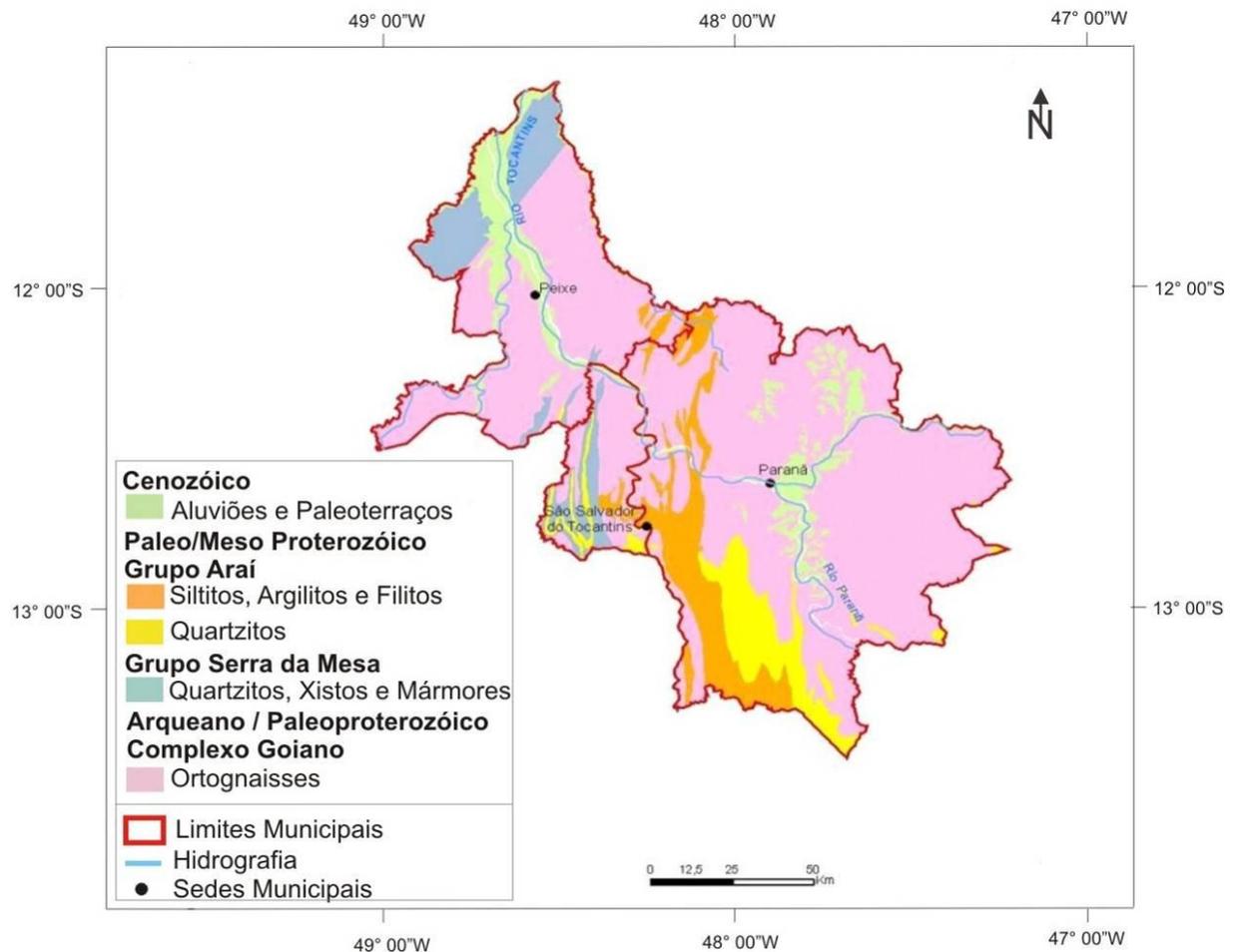


Figura 3.6 - Contexto geológico regional em escala 1:1.700.000 (Souza, 2008).

De acordo com Campos *et al.* (2005), o substrato das áreas de investigação é representado por filitos, quartzitos, metabasaltos, calcifilitos, xistos e mármoreos estratificados ou na forma de lentes, com frequentes intercalações de lentes de mármoreos com espessuras variáveis de 20 a 80 cm.

Rochas graníticas e gnáissicas são facilmente observadas na poção norte das áreas de estudo, enquanto que nas áreas de ocorrência dos grupos Araí e Serra da Mesa, há predomínio de cristas e serras compondo relevos acidentados, nos quais se destacam os quartzitos. Nas áreas mais baixas, representadas pela sequência Palmeirópolis ocorrem metabasaltos, metapelitos e sedimentos químicos, incluindo mármore.

Esse conjunto de rochas foi submetido a esforços tectônicos que resultaram em fraturas que apresentam direção geral N30-45E. Essa direção de fratura, em associação com seu par conjugado (N45-60W), é o conjunto de fraturamento que apresenta as maiores aberturas na região.

Ainda de acordo com Campos *et. al.* (2005), os tipos petrográficos, por unidade litológica, são:

- Grupo Serra da Mesa: intercalações de quartzito cinza, calcítico, com sulfetos disseminados; quartzito de textura granoblástica e cor branca com níveis de xistos associados; quartzito impuro com intercalações de níveis de xisto e metacalcário margoso; mica xisto calcífero com veios de quartzo e carbonato; e mármore impuro cor cinza escuro, granulação fina, com intercalações de biotita-hornblenda gnisse; e pacote espesso e homogêneo de quartzo xisto de cor cinza e textura lepidoblástica.
- Grupo Araí: quartzito sacaroidal castanho-amarelado, com granulação média e friável; filito de cor cinza escuro com boudins de quartzo e níveis de quartzitos intercalados; quartzito impuro com intercalações de níveis de xisto e metacalcário margoso; metarcóseo de cor cinza friável; pacote espesso e homogêneo de quartzo xisto de cor cinza e textura lepidoblástica.
- Sequência Meta Vulcanossedimentar de Palmeirópolis: mica xisto calcífero com veios de quartzo e carbonato; biotita-quartzo-muscovita xisto calcífero, com textura granoblástica com sulfeto disseminado e intercalações de veio de quartzo; mármore impuro cor cinza escuro, granulação fina, com intercalações de biotita-hornblenda gnisse; e anfibolito fino (metabasalto), com cor de alteração amarelada e presença de sulfeto disseminado.
- Embasamento: rocha gnáissica de composição gabróica, cor cinza escuro, textura granoblástica média, com níveis calcíticos e veios de quartzo e sulfetos disseminados; rocha granítica cinza clara de textura granoblástica média; biotita gnisse cinza claro, com textura granolepidoblástica média, com níveis xistosos devido ao incremento da proporção de biotita; leucognaisse com muscovita, e agregados máficos, com estiramento de minerais e bandamento composicional proeminente; e biotita gnisse com granada, granulação média e cor cinza claro.

A Figura 3.7 reproduz um exemplo de perfil litoestratigráfico, obtido em registros de perfuração de poço tubular profundo nas áreas de estudo.



Figura 3.7 - - Exemplo de perfil litoestratigráfico da área de estudo (adaptado de Vasconcelos, 2009).

3.4 Padrões de Relevo

Em função da compartimentação geomorfológica e das particularidades geológicas, as áreas de estudo caracterizam-se por padrões de relevo específicos, os quais podem ser agrupados por unidades, conforme descrição que segue.

3.4.1 Reassentamentos Piabanha I e II

Nessa unidade, a compartimentação geomorfológica compreende, basicamente, duas unidades de relevo: Serra Dourada, localizada na porção oeste, e Planície do rio Tocantins, na porção leste. O conjunto dessas unidades promove um nítido contraste de declividades, que se acentuam de leste para oeste (Campos & Fiori, 2009).

Na região da serra, caracterizada por relevo montanhoso e forte ondulado, ocorrem as maiores declividades. As cotas do terreno variam de 390 a mais de 600 metros (Figura 3.9).

Essas áreas apresentam rede de drenagem de alta densidade, com cursos d'água, em sua maioria, intermitentes. Contudo, existem algumas nascentes perenes que contribuem para o rio Piabanha, pequeno tributário do rio Tocantins.

A região mais baixa é caracterizada pelo relevo pouco ondulado e dissecado, sendo que as cotas topográficas variam de 300 a 360 metros (Figura 3.9).

3.4.2 Reassentamento Buriti-Piabanha

Nos terrenos dessa unidade são observados dois compartimentos geomorfológicos.

O primeiro, que se inicia nas margens do rio Tocantins e se estende em direção às áreas de maior declive, é caracterizado por padrão de relevo ondulado a suave ondulado, onde a tendência erosiva e de transporte de material supera ligeiramente os processos de formação de solo, ou seja, de pedogênese e acumulação.

A densidade de drenagem nessas áreas é moderada, e todos os cursos d'água existentes são de natureza intermitente.

O outro compartimento apresenta relevos positivos na forma de cristas alinhadas e serras sustentadas por quartzitos do Grupo Araí, com variações de cotas topográficas entre 390 e 450 metros (Figura 3.9). Nessa condição, a erosão e transporte superam, significativamente, a pedogênese e acumulação, enquanto que as drenagens são caracterizadas por grotas, todavia, intermitentes em suas totalidades.

3.4.3 Reassentamento Jataí

Ao contrário dos demais reassentamentos, nessa área ocorre apenas um compartimento geomorfológico, caracterizado por padrão de relevo que varia de plano a suave ondulado, muito pouco dissecado, onde as cotas variam de 270 a 300 m (Figura 3.9 Figura 3.10).

Em geral, os terrenos apresentam baixas declividades, condição que, sob o ponto de vista de balanço geodinâmico, implica na tendência de predomínio da pedogênese e acumulação sobre a erosão e o transporte de materiais.

A rede de drenagem é tipicamente caracterizada pela baixa densidade e intermitência.

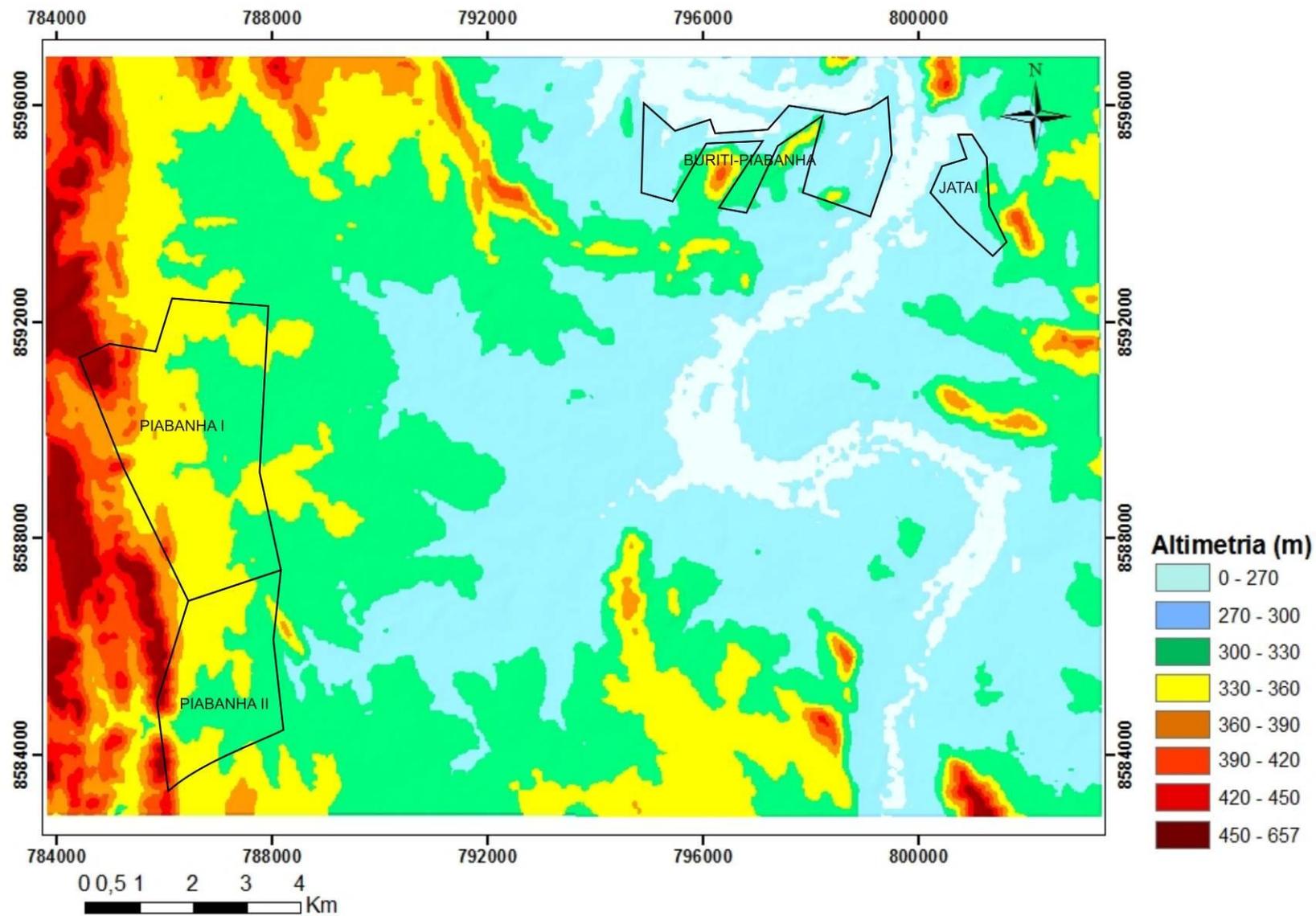


Figura 3.9 - Mapa hipsométrico das áreas de estudo.

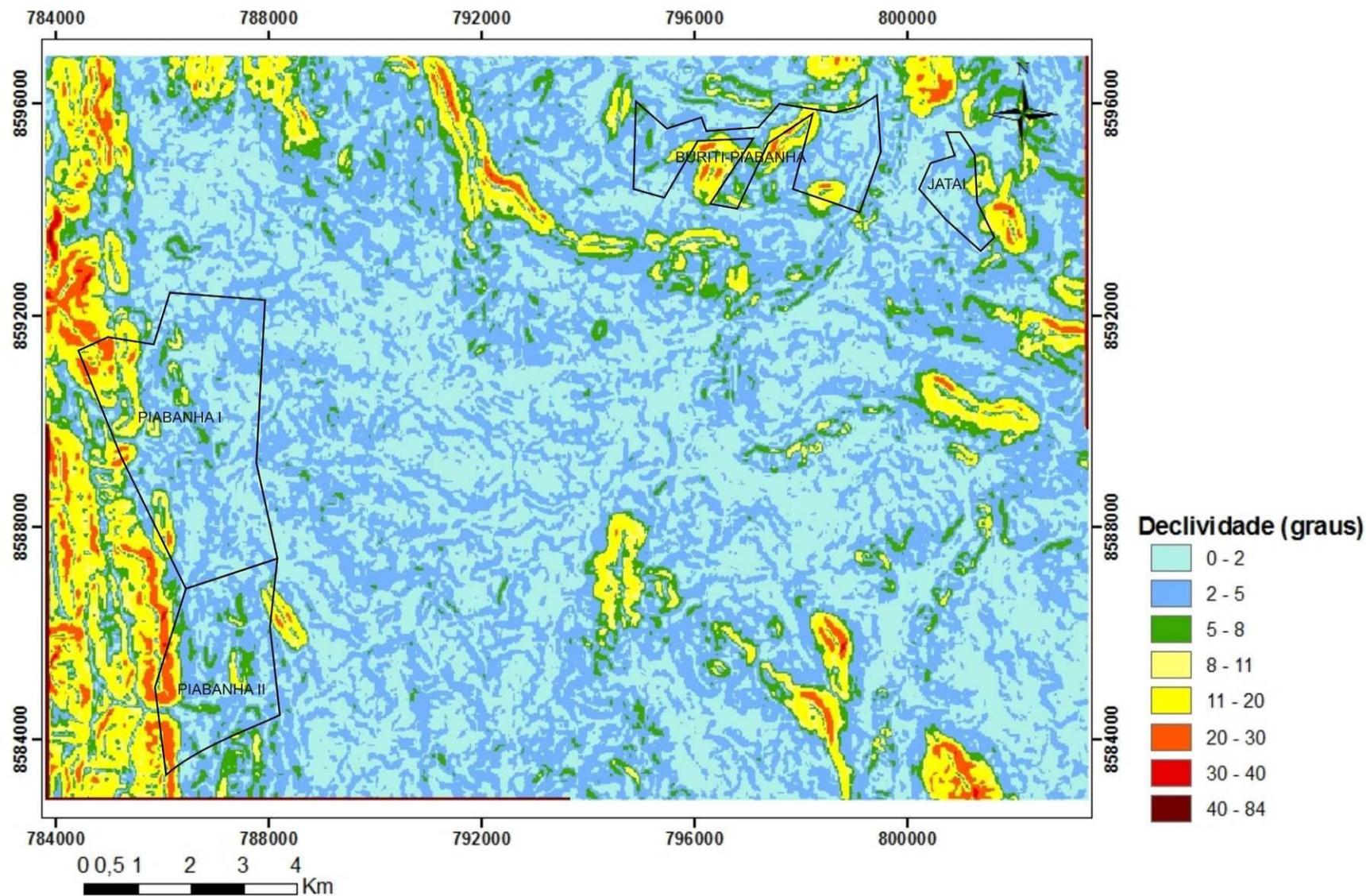


Figura 3.10 - Mapa de declividade das áreas de estudo.

3.5 Solos

Quanto à pedogênese, os solos da região são, na maioria, derivados de processos de alteração *in situ*, em que o solo residual é tipicamente constituído por mantos de alteração saprolíticos.

Na região em que se inserem as áreas de estudo, ocorrem várias classes de solos. Porém, de acordo com Campos & Fiori (2009), os solos mais comuns na região são representados por Latossolo Vermelho Distrófico, Cambissolo Háptico, Neossolo Litólico e Neossolo Flúvico.

Na sequência, são agrupadas as classes de solos predominantes nos Reassentamentos que abrigam os sítios amostrais.

3.5.1 Reassentamentos Piabanha I e II

A Figura 3.11 representa o mapa pedo-geológico dos Reassentamentos Piabanha I e II.

Os Neossolos Litólicos são encontrados na porção mais elevada do terreno (borda leste da Serra Dourada). Apresentam pedregosidade e rochiosidade, sendo desenvolvidos a partir do intemperismo de granitos, gnaisses e material psamítico.

Na porção mais rebaixada, em áreas restritas sobre rochas psamíticas, há ocorrência de pequenas manchas de neossolos quartzarênicos e regolítico arenoso, esbranquiçado a ocre, desenvolvido *in situ* pela alteração de gnaisses.

Os solos latossolizados (“Latossolos”) ocorrem apenas em pequenas manchas a partir do médio curso dos córregos Piabanha e Calango, onde o terreno é plano e arrasado (porção remanescente da Fazenda Piabanha). É um solo espesso, sem distinção clara dos horizontes, com baixa fertilidade natural, porém, com aptidão para atividades agropecuárias, sob o ponto de vista de física do solo.

Os Cambissolos Hápticos ocorrem em toda a porção leste da área, em terreno suave ondulado. A existência de cascalho de quartzo dentro dos primeiros 70 cm do perfil é uma característica notável desses solos.

Inspeções de campo, baseadas em critérios estabelecidos por IBGE (2007) e EMBRAPA (2006), possibilitaram a identificação de solos podzolizados, doravante considerados como associações de Argissolos e Nitossolos. Em boa parte desses solos, constatou-se caráter concrecionário, ocasionado por material petroplíntico descontínuo. Também foi identificada pequena mancha de Chernossolo.

Excetuando-se os “Latossolos”, os demais solos também apresentam cascalhos de quartzo nos horizontes superficiais. Essa característica tende a conferir elevada permeabilidade nos horizontes superficiais, o que contrasta com as camadas mais profundas (50 a 70 cm). O horizonte cascalhento também é importante limitador da erodibilidade.

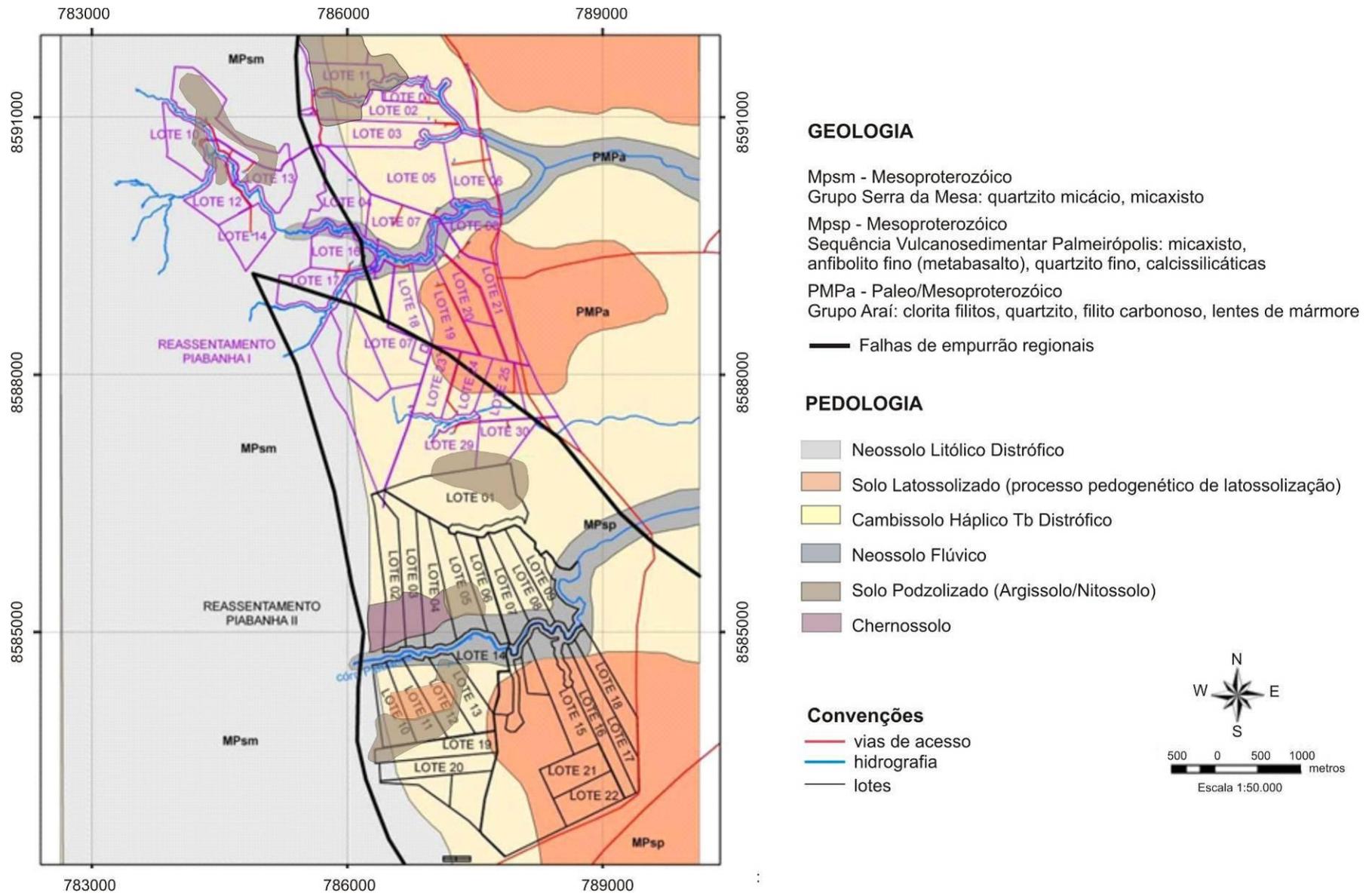


Figura 3.11 - Mapa pedo-geológico dos reassentamentos Piabanha I e II (adaptado de Campos & Fiori, 2009).

3.5.2 Reassentamento Buriti-Piabanha

A geologia e os solos presentes nessa área de reassentamento são apresentados na Figura 3.12.

Nesse reassentamento há predomínio de Cambissolos Háplicos, com pedogênese em estágio inicial e cujos perfis geralmente são limitados a pouco mais de 60 cm, caracterizando bem a ocorrência de horizonte B incipiente. Apresentam ocorrência em terrenos com relevo suave ondulado, com declividades de 5 a 10%. Uma característica notável desses solos é a elevada pedregosidade, constituída por cascalho de quartzo.

Pequenas manchas de Neossolos Quartzarênicos associados à Neossolos Regolíticos também são encontradas em áreas de relevo plano a suave ondulado, nas proximidades do rio Tocantins. O mineral quartzo predomina em mais de 90% das frações areias grossa e fina.

Neossolos Flúvicos são encontrados nas proximidades do rio Tocantins, em terrenos planos e onde os solos são derivados de depósitos aluvionares, com horizonte A sobre horizonte C, sem relação pedogenética entre eles.

Os Latossolos são encontrados em pequenas manchas, as quais são dispostas em regiões de cotas intermediárias, porém, de topográfica plana a suave ondulada. Nesses casos, evidencia-se avançado estágio de intemperização no horizonte B, cuja espessura pode ultrapassar os 300 centímetros.

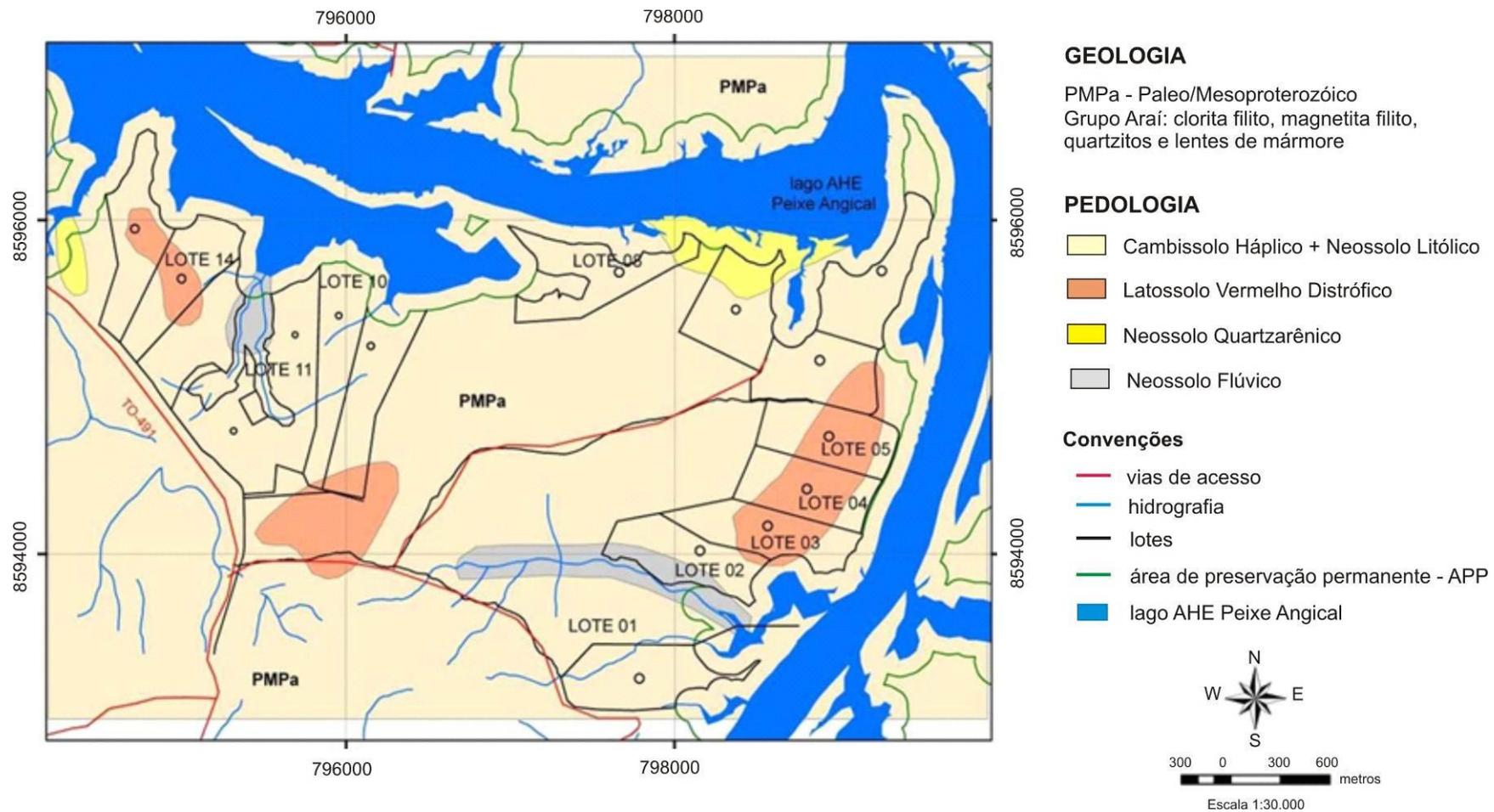


Figura 3.12 - Mapa pedo-geológico do reassentamento Buriti-Piabanha (adaptado de Campos & Fiori, 2009).

3.5.3 Reassentamento Jataí

Nesse reassentamento ocorrem Latossolos, Neossolos quartzarênicos, Cambissolos Háplicos em associação com Neossolo Litólico e Neossolo Flúvico (Figura 3.13).

Os Latossolos apresentam horizonte B latossólico, decorrente de avançado estágio de pedogênese. Apresenta A fraco, ou no máximo moderado, com espessura superior a 300 centímetros. Ocorrem em áreas de relevo plano a suave ondulado, com declividades inferiores a 3%. Diferentemente dos demais reassentamentos, o fenômeno da latossolização é evidenciado em mais de 50% dessas áreas.

A Associação de Cambissolos Háplicos e Neossolos Litólicos ocorrem nos relevos suave ondulado e médio ondulado. Esses solos são caracterizados pelo estágio inicial de pedogênese, sendo que suas espessuras, em geral, não ultrapassam os 60 centímetros. No horizonte B pouco desenvolvido são encontrados restos minerais em decomposição, formando a massa do solo. Enquanto os Cambissolos ocorrem em declividade de 5 a 10%, os Neossolos são mais comuns em declividades superiores a 10%.

Nas áreas mais baixas também ocorrem os Neossolos Flúvicos, os quais representam aproximadamente 35% dessas áreas. Esses solos são derivados de aluvião recente e paleoterraços do rio Tocantins e afluentes. Apresentam horizonte A sobre horizonte C constituídos, com sequência de horizontes truncados e sem relação pedogenética entre si. Ocorrem sobre relevo plano e suave ondulado a ondulado, com declividades menores que 5% e com uma distribuição em aproximadamente 35% do total da área.

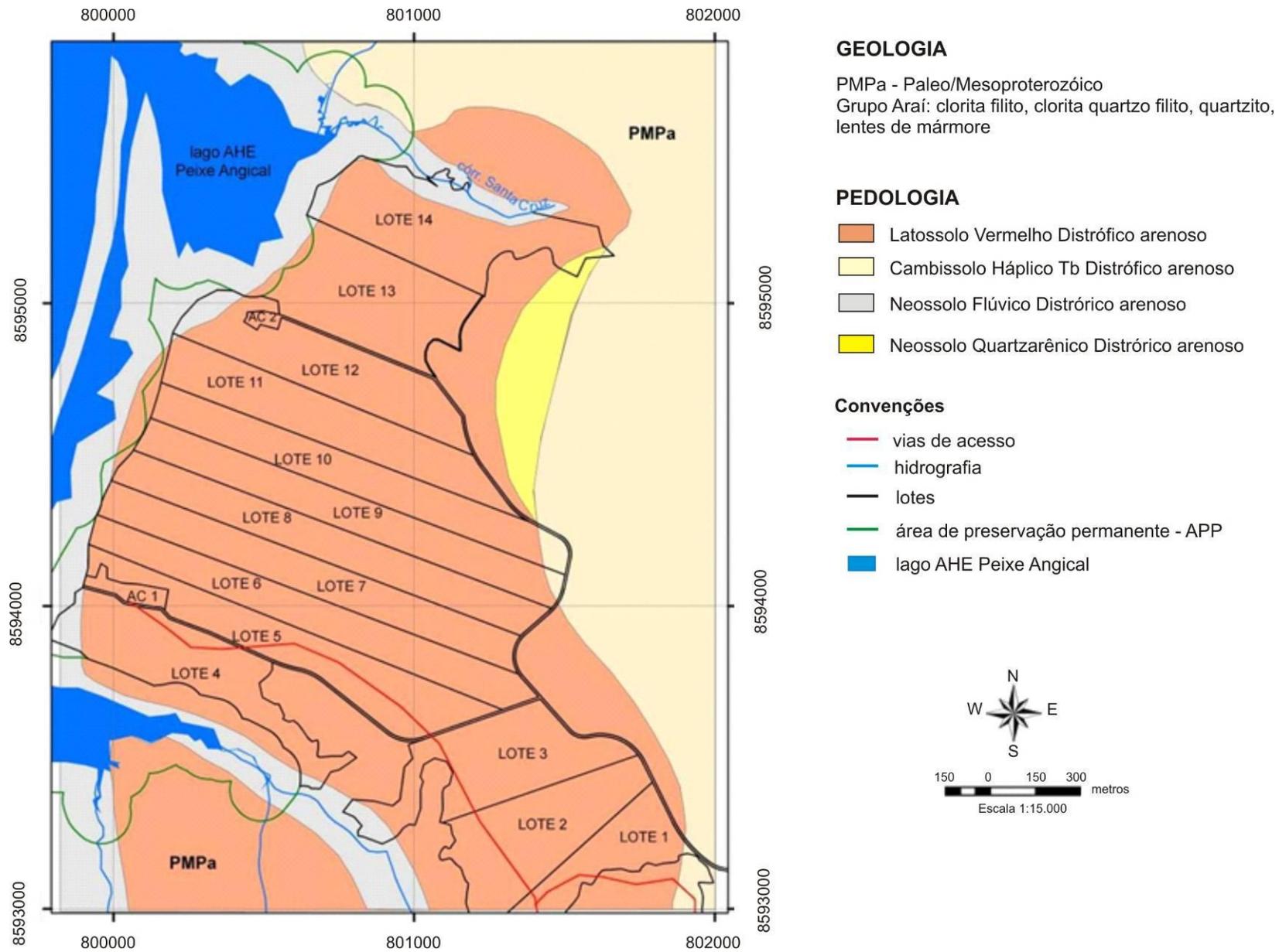


Figura 3.13 - Mapa pedo-geológico do reassentamento Jataí (adaptado de Campos & Fiori, 2009).

3.6 Hidrogeologia

A presente caracterização hidrogeológica é apresentada considerando-se o aquífero como todo material geológico (rocha, saprolito ou solo), que seja capaz de armazenar e conduzir água no estado líquido ou de vapor, conforme representação esquemática contida na Figura 3.14.

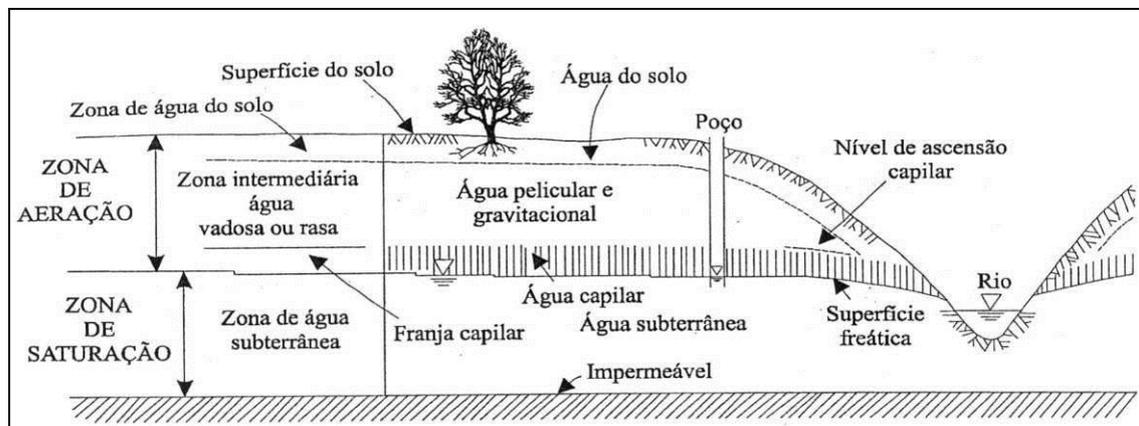


Figura 3.14 - Representação das diversas formas de água subterrânea (Feitosa & Filho, 2000).

Em que pese possíveis divergências com outros conceitos clássicos, os sistemas aquíferos são, em geral, constituídos por uma porção mais rasa, caracterizada como zona de aeração, e pela porção efetivamente saturada de água. Nesse contexto, a geometria dos aquíferos envolve tanto o solo com as rochas (Figura 3.14).

Na porção rasa do aquífero, comumente denominada de zona não saturada ou zona vadosa, a água ocorre na forma de vapor ou na forma de umidade do solo (retida nas partículas do solo por meio de forças de coesão). Nessa zona são desempenhadas as funções filtro e regulação do aquífero. A função filtro é referente ao papel depurador natural das águas, que infiltram a partir da superfície em direção às porções mais profundas do aquífero. A função reguladora é relacionada ao papel de transferência das águas subterrâneas para as drenagens superficiais, assegurando a manutenção de nascentes, córregos e rios, mesmo durante o período de estiagem.

Logo abaixo, ocorre a zona saturada do aquífero, onde todos os espaços poros, fraturas ou vazios cársticos são preenchidos por água. Nessa zona tipicamente é desempenhada a função reservatório.

A conectividade das águas dos aquíferos com as demais fases do ciclo hidrológico se dá pelos mecanismos de recarga e descarga. O primeiro relaciona-se com o abastecimento do aquífero, fenômeno que se dá, principalmente, por meio dos mecanismos de interceptação e infiltração das águas de chuva. A descarga ocorre quando os componentes geologia, relevo e nível potenciométrico favorecem a formação de nascentes ou os exutórios para corpos hídricos

superficiais. Ainda em função das características geológicas e de relevo, os aquíferos podem estar interligados a cursos hídricos superficiais, sendo que nessa condição poderá ocorrer tanto as surgências difusas como recargas, dependendo do gradiente hidráulico estabelecido.

A hidrogeologia local, portanto, pode ser caracterizada por dois tipos de sistema aquíferos. O sistema freático, de domínio intergranular e de ocorrência nos solos residuais, e o sistema cristalino, associado a rochas do embasamento (granito e gnaisses), xistos do grupo Serra da Mesa, filitos do Grupo Araí e xistos e anfibólitos da Sequência Meta Vulcanossedimentar de Palmeirópolis.

Detalhamentos realizados por Campos & Seidel (2005) diagnosticaram quatro sistemas aquíferos na região onde se inserem as áreas, os quais foram distinguidos em função do tipo de domínio e das variações de parâmetros hidrodinâmicos como transmissividade, condutividade hidráulica e capacidade específica (Figura 3.14).

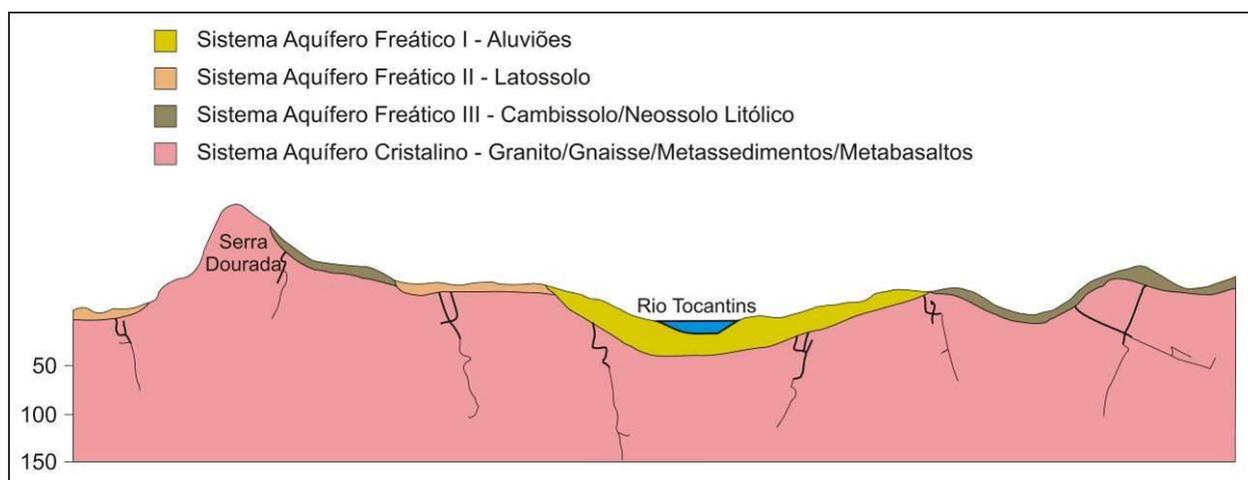


Figura 3.14 - Sistemas aquíferos presentes nas áreas de estudo (adaptado de Campos & Seidel, 2005).

O Sistema Freático I relaciona-se ao atual vale fluvial e ao paleo canal aluvial do Rio Tocantins. Litologicamente, esse sistema inclui os aluviões ou alternativamente os Neossolos Flúvicos (principalmente suas porções de granulometria mais grossa). A condutividade hidráulica varia de alta a muito alta, com média em torno de 10^{-4} m/s (Campos & Seidel, 2005). A transmissividade deverá variar de forma extrema, sendo os valores mais elevados esperados nas áreas de ocorrência dos aluviões mais grossos e mais espessos, enquanto que os menores valores são encontrados nas áreas de aluviões lamosos e mais delgados ligados ao canal fluvial atual e sua planície de inundação.

A recarga desse sistema se dá tanto pela infiltração de águas de chuva ou pela água dos rios. Já a descarga tende a se processar por meio de nascentes difusas, contribuintes do rio Tocantins ou de tributários desse.

O Sistema Aquífero Freático II ocorre em áreas de Latossolizados de textura arenosa ou em áreas mais restritas, como Neossolos Quartzarênicos. Representa um sistema intergranular típico, onde estão localizadas as mais importantes áreas de recarga regionais dos aquíferos. Sob o ponto de vista topográfico, ocorrem em áreas planas, onde predominam declividades inferiores a 8%.

A condutividade hidráulica nesse sistema é da ordem de 10^{-6} m/s, podendo alcançar valores ainda maiores (Campos & Seidel, 2005).

O Sistema Aquífero Freático III é composto por Cambissolos Háplicos e Neossolos Litólicos. Em ambas as classes, são comuns a existência de fragmentos de rochas e quartzo. Compõem aquíferos intergranulares, descontínuos, livres e muito restritos lateralmente, cujo potencial hidrogeológico é restrito ao abastecimento de residências isoladas ou pequenas comunidades.

A condutividade hidráulica e a transmissividade no Sistema Aquífero III são consideradas muito baixas, variando de 10^{-8} m/s a 10^{-7} m²/s (Campos & Seidel, 2005). A camada de cascalhos, comumente observada na porção superior, funciona como uma esponja de captação das águas de precipitação de chuvas. Contudo, quando essas águas alcançam a interface horizonte A - B incipiente, há forte interceptação, tendo como consequência interfluxo ou mesmo descarga direta para drenagens intermitentes, quando o relevo permitir.

Há de se destacar que durante as avaliações de campo foram diagnosticadas manchas de solos podzolizados no Sistema Freático III, normalmente associadas à Neossolos Litólicos ou Cambissolos. Nessas condições, a porosidade e a geometria do aquífero são sensivelmente aumentadas.

A profundidade das zonas freáticas é diretamente dependente das condições de relevo, sendo que nos sítios de amostragens existe variação desde pouco mais de 3 metros, nas áreas mais baixas e próximas a cursos hídricos, até mais de 20 metros, em áreas com maiores cotas (Campos & Seidel, 2005).

As variações nas condições hidráulicas do sistema freático, particularmente no que diz respeito à condutividade hidráulica, assim como as variações no solo residual, constituído por manto de alteração saprolítico com fragmentos de materiais originários, caracterizam esse sistema como heterogêneo e anisotrópico.

O sistema aquífero cristalino inclui unidades psamíticas e pelíticas do Grupo Araí, xistos do Grupo Serra da Mesa, anfíbolitos e mármore da Sequência de Palmeirópolis e a rochas do embasamento. É classificado como um aquífero fraturado, anisotrópico, livre, com moderada importância hidrogeológica local e com vazões variando de 1 a 20 m³/h, de acordo com registros obtidos em poços tubulares profundos da região (HIDRONORTE, 2011). Em razão da área de

distribuição desse subsistema, ou seja, ocorrendo em praticamente toda a extensão da região, apresenta razoável potencial para abastecimento de pequenos aglomerados e de propriedades rurais (Campos & Fiori, 2009).

Os aquíferos intergranulares das áreas de estudo são recarregados diretamente por infiltração de águas de precipitação pluvial. Já os aquíferos fraturados são recarregados a partir dos sistemas sobrepostos. Em locais específicos, a relação entre esses dois domínios de águas subterrâneas pode ser inserida em um modelo conceitual de única superfície potenciométrica, em que as fraturas na rocha firme apresentam-se como extensão da zona saturada do solo/saprolito (Campos & Seidel, 2005; Campos & Fiori, 2009).

A descarga do aquífero freático se dá por exutórios, do tipo nascentes de contato na interface entre os solos e a rocha alterada, onde há importante contraste de condutividade hidráulica. As referidas surgências não são do tipo pontuais, mas difusas com descarga em vários pontos compõem a rede de córregos existente na região (Campos & Fiori, 2009).

CAPÍTULO IV

HIDROQUÍMICA

4.1 Fundamentação Teórica

Embora os padrões hidroquímicos constituam a principal ferramenta para classificação e caracterização da qualidade das águas subterrâneas, eles representam, na verdade, o resultado das interações entre os recursos hídricos e os ambientes de circulação. De maneira geral, tais padrões podem ser entendidos como a assinatura geoquímica do meio sobre o fluído percolante.

De acordo Feitosa *et al.* (2008), a mineralização das águas subterrâneas é caracterizada pelo produto das interações entre fatores endógenos (sistemas de fluxo, tipo litológico, tipo de estruturas, processos geoquímicos e microbiológicos em subsuperfície) e exógenos (aspectos climáticos e geofisiográficos) e constitui-se em um extenso campo de pesquisa, principalmente quando consideradas as condições de intemperismo típicas de regiões tropicais.

Entendimento similar é apresentado por Gastmans *et al.* (2005). Esses autores avaliam que a composição final das águas subterrâneas é produto da associação entre a mineralogia das rochas que as contêm e dos fatores climáticos.

Em alguns casos, o componente antrópico passa a ter expressiva importância, uma vez que apresenta potencial para influenciar tanto na qualidade microbiológica como na qualidade físico-química dos recursos hídricos subterrâneos.

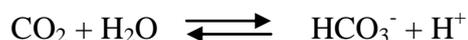
A escolha dos parâmetros hidroquímicos deve ser baseada no conhecimento prévio da geologia da região, das formas de uso e ocupação e, ainda, na premissa de que os padrões de qualidade das águas subterrâneas são produtos da interação com o meio.

Em metodologia desenvolvida para os domínios de Distrito Federal, Boaventura & Freitas (2006) demonstram as relações existentes entre os indicadores de maior relevância para a avaliação da qualidade da água subterrânea, consideradas as características do meio físico e antrópico. A geologia, por sua vez, apresenta-se como a variável de maior destaque na definição desses indicadores.

Além de influenciar na matriz iônica das águas subterrâneas, a geologia das áreas de estudo também oferece condições para a estabilidade hidroquímica, representada pelos teores de sólidos totais dissolvidos (TDS) ou pela condutividade elétrica. Assim, independentemente da época do ano ou do volume de água nos aquíferos, esses parâmetros hidroquímicos permanecem praticamente inalterados.

As águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas existentes na região onde estão inseridas as áreas de estudo (Souza, 2008) demonstram a favorabilidade geoquímica do meio em disponibilizar íons como cálcio, magnésio, carbonato e bicarbonato.

A existência de espécies de carbono em meio aquoso faz com que os equilíbrios químicos propostos por Manaham (1991) sejam aplicáveis a essas águas:



Esses equilíbrios podem ser representados na forma de diagrama, onde, dadas as condições de pH naturalmente existentes, nota-se o nítido predomínio do ânion bicarbonato (Figura 4.1).

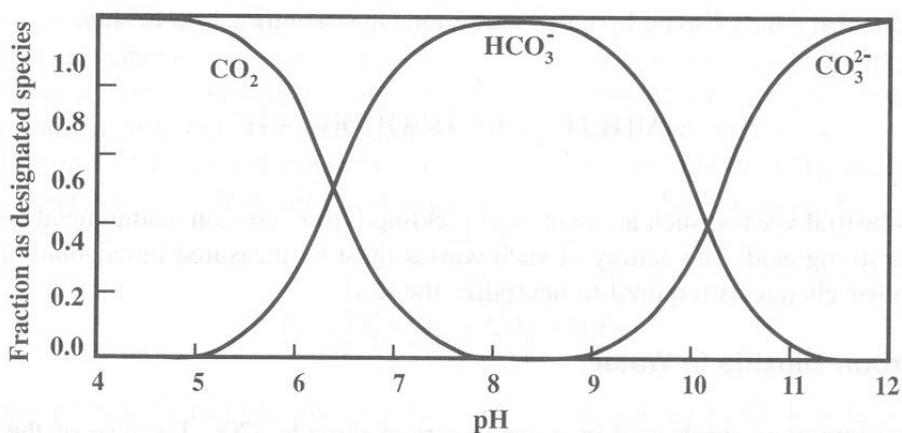


Figura 4.1 - Comportamento das espécies químicas do carbono em relação ao pH (Manaham, 1991).

A presença do cálcio no sistema, por sua vez, implica no equilíbrio entre precipitação e solubilização da calcita (Langmuir, 1997), definido pelas variações do pH das águas subterrâneas e que pode ser representado pelas equações seguintes:



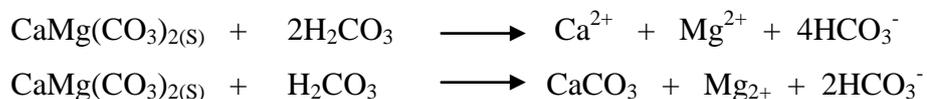
Saksono *et al.* (2009) também demonstram esses processos de precipitação e solubilização do carbonato de cálcio em função do pH, em ensaios realizados para avaliar os efeitos do campo magnético sobre o comportamento do carbonato de cálcio.

A existência de sulfeto disseminado em algumas litologias faz com que o enxofre, na forma oxidada (SO₄⁻), também participe dos equilíbrios químicos (Brookins, 1988), conforme a seguinte reação:



Em função das condições do meio, essa reação de precipitação pode ocorrer na forma de gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

A dissolução da dolomita também pode contribuir para o equilíbrio do sistema disponibilizando bicarbonato e cálcio. De acordo com Edmunds *et al.* (1983, apud Abid *et al.* 2011), a dissolução completa ou parcial da dolomita é representada pelas reações:



O magnésio disponibilizado permanece em solução e, ao contrário do cálcio, não sofre especiação em função das condições de pH encontradas nessas águas (Brookins, 1988). Apenas participa do componente condutividade elétrica ou TDS.

Os principais condicionantes ambientais das áreas estudadas, e que contribuem para o processamento dessas reações de equilíbrio, relacionam-se com a existência de lentes de metacalcários/metadolomito e de saprolitos formados, principalmente, por xistos e micaxistos com resíduos de carbonato (Souza, 2008; Campos & Fiori, 2009).

Velasquez *et al.* (2003) identificaram a importante participação dos xistos na disponibilização de carbonatos às águas subterrâneas no médio Jequitinhonha, Minas Gerais.

Em estudos realizados nas bacias dos rios Penna-Chitravathi, na Índia, Reddy & Nirajam Kumar (2009) contataram que as interações entre a água e as rochas, com processos de dissolução de carbonatos e de troca iônica, foram responsáveis pela manutenção da composição geoquímica dos recursos hídricos subterrâneos, mesmo em condições de mudança no volume de água do aquífero.

A possibilidade de disponibilização de carbonatos por meio de minerais como feldspatos e plagioclásios também não pode ser descartada, contudo com participação minoritária quando comparada às rochas carbonáticas.

Mesmo com as diferenças no contexto geológico, pesquisas realizadas por Chang *et al.* (2003) nos municípios de Mogi Mirim, Mogi Guaçu e Itapira, no estado de São Paulo, consideraram a hipótese de disponibilização de íons como cálcio e carbonatos por meio das reações de transformação de feldspatos e plagioclásios em minerais secundários.

4.2 Resultados Analíticos

As análises realizadas foram direcionadas aos aspectos físico-químicos, tendo em vista que um dos objetivos do trabalho de pesquisa se relaciona com a avaliação do comportamento da estabilidade química das águas dos aquíferos freáticos.

Foram determinados os seguintes parâmetros: pH, condutividade elétrica, cálcio, magnésio, ferro, silício, alumínio, sódio, potássio, flúor, cloro, nitrato, sulfato, alcalinidade em

bicarbonato e gás carbônico dissolvido. O nitrato, por representar o estágio final de oxidação da matéria orgânica, foi utilizado apenas para dar uma idéia dos efeitos da antropização sobre os sítios amostrais.

O uso da condutividade elétrica se deu em virtude do equipamento utilizado fornecê-la de maneira direta, enquanto e os teores de sólidos totais - TDS são obtidos por meio de conversão. Ademais, tendo em vista o principal fundamento desse tipo de avaliação, ou seja, verificação de possíveis oscilações nas concentrações iônicas e, ainda, o fato de os principais elementos do sistema ter sido objeto de análises químicas, a opção em se trabalhar com um ou outro parâmetro é indiferente.

Em relação ao pH, observaram-se variações de 6,18 a 7,42, no período chuvoso, e de 6,75 a 8,21, no período seco (Figura 4.2). As respectivas médias para esses períodos foram 6,75 e 7,44. Os resultados indicaram a tendência das águas apresentarem-se valores de pH ligeiramente superiores durante o período seco. Os valores médios de pH registrados nos períodos chuvoso e seco apresentaram diferença significativa, em nível de significância (α) de 5%.

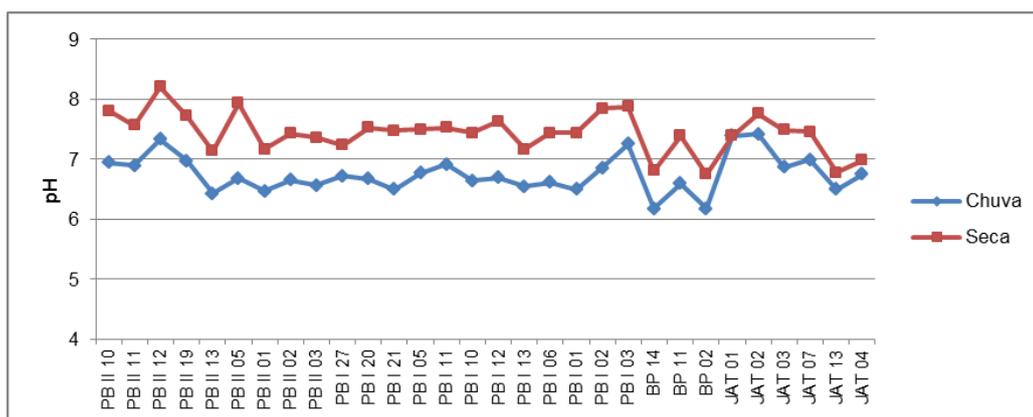


Figura 4.2 - Variação dos valores de pH em função da época do ano.

Souza (2008) explica que a redução do pH das águas freáticas da região durante o período chuvoso é decorrente da entrada de água de chuva no sistema, a qual apresenta caráter ácido em função do CO_2 dissolvido, assim como pelas interações com os materiais constituintes do ambiente de percolação, faz com que haja diminuição.

Por meio de medidas realizadas em 02 de dezembro de 2011, obteve-se valor de pH das águas de chuva igual a 6,6. Medições realizadas nessa mesma data, porém, em águas de escoamento superficial sobre solo com presença de cascalhos de quartzo, identificaram valor de pH igual a 5,5.

Quanto à condutividade elétrica das águas subterrâneas constataram-se variações de 114 a 882 $\mu\text{S}/\text{cm}$ na época chuvosa, e oscilações de 73 a 906 $\mu\text{S}/\text{cm}$ na época de seca.

As maiores médias de condutividade elétrica foram encontradas nos reassentamentos Piabanha I e II, ou seja, $426,14\mu\text{S}/\text{cm}$ para o período chuvoso e $452,6\mu\text{S}/\text{cm}$ para o período seco.

No reassentamento Jataí esses valores compreenderam de $273,16\mu\text{S}/\text{cm}$ na época chuvosa e $275,83\mu\text{S}/\text{cm}$ durante a seca.

Os menores valores foram registrados no reassentamento Buriti-Piabanha, cujas médias de período chuvoso e seco foram, respectivamente, $138,97$ e $185,50\mu\text{S}/\text{cm}$.

As Figuras 4.3, 4.4 e 4.5 demonstram o comportamento das unidades amostrais Piabanha I e II, Buriti-Piabanha e Jataí, em relação à condutividade elétrica.

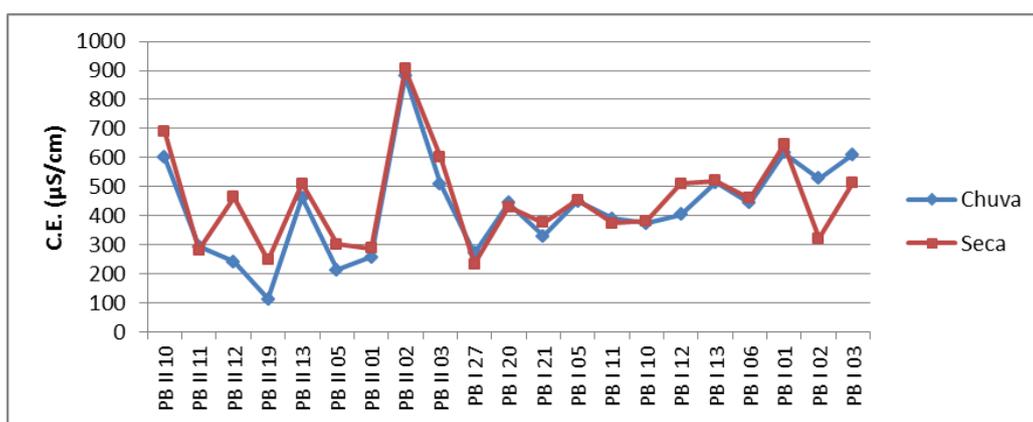


Figura 4.3 - Condutividade elétrica nos reassentamentos Piabanha I e II (em $\mu\text{S}/\text{cm}$).

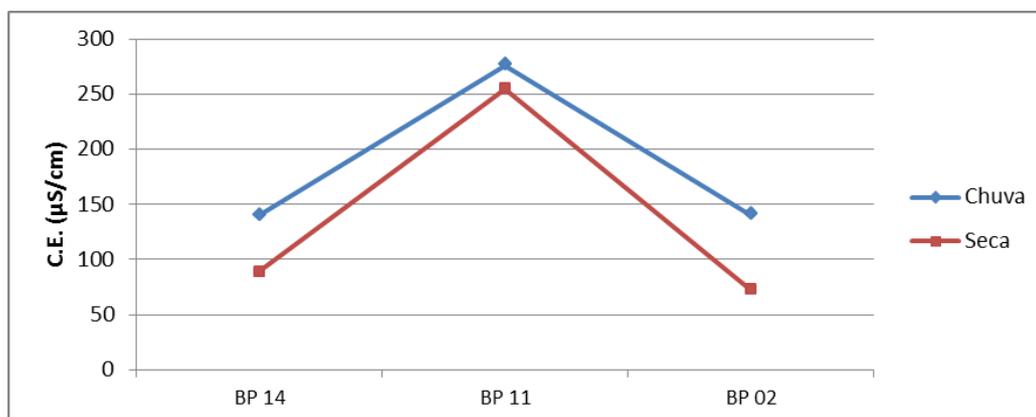


Figura 4.4 - Condutividade elétrica no reassentamento Buriti-Piabanha (em $\mu\text{S}/\text{cm}$).

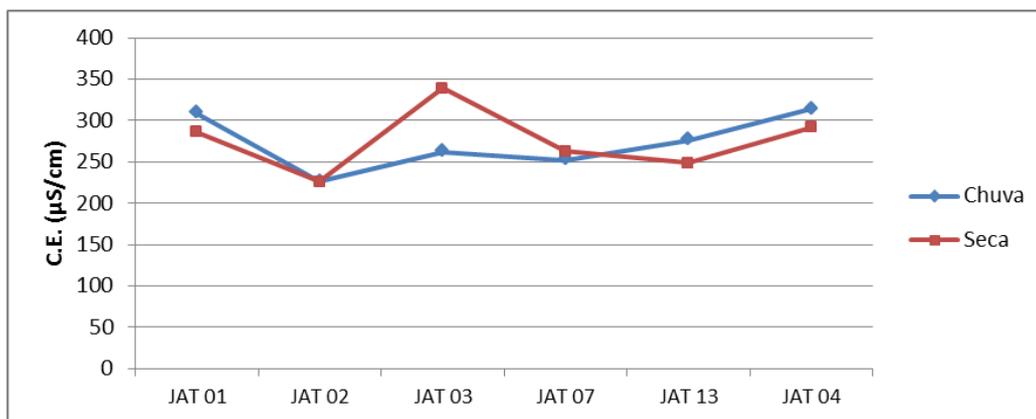


Figura 4.5 - Condutividade elétrica no reassentamento Jataí (em µS/cm).

Apesar de serem constatadas diferenças no comportamento da condutividade elétrica entre as unidades pedo-geológicas que abrigaram os conjuntos dos sítios amostrais e, ainda, de o pH manter elevada correlação com os valores de condutividade elétrica, 0,94 no período seco e 0,96 no período chuvoso, no cômputo geral não existiram variações significativas para as médias desse parâmetro entre as duas épocas do ano.

Tendo-se como base a análise de variância (ANOVA) do parâmetro condutividade elétrica (log), ao nível de significância de 5%, percebe-se que as variações das médias entre os diversos sítios amostrais são muito mais expressivas do que as variações, em meses distintos, para o mesmo sítio amostral (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 - Análise de Variância (ANOVA) da condutividade elétrica (log) obtida nos monitoramentos

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Sítios amostrais	5,3437	20	0,2672	70,72	3,29E-74	1,63
Meses do ano	0,1447	9	0,0161	4,26	5,09E-05	1,93
Erro	0,6800	180	0,0038			
Total	6,1684	209				

Medidas efetuadas em poços localizados na mesma região de estudo, no ano de 2009, corroboram com as constatações da presente pesquisa. De acordo Campos & Fiori (2009) há forte estabilidade nos valores de condutividade elétrica, consideradas as épocas chuvosa e seca.

Os dados dos monitoramentos *in situ*, realizados nas onze campanhas distribuídas entre novembro de 2010 e fevereiro de 2012 (Anexos I-A e I-B), também demonstraram oscilação nas médias de pH e tendência à estabilidade nos valores médios de condutividade elétrica (Figura 4.6).

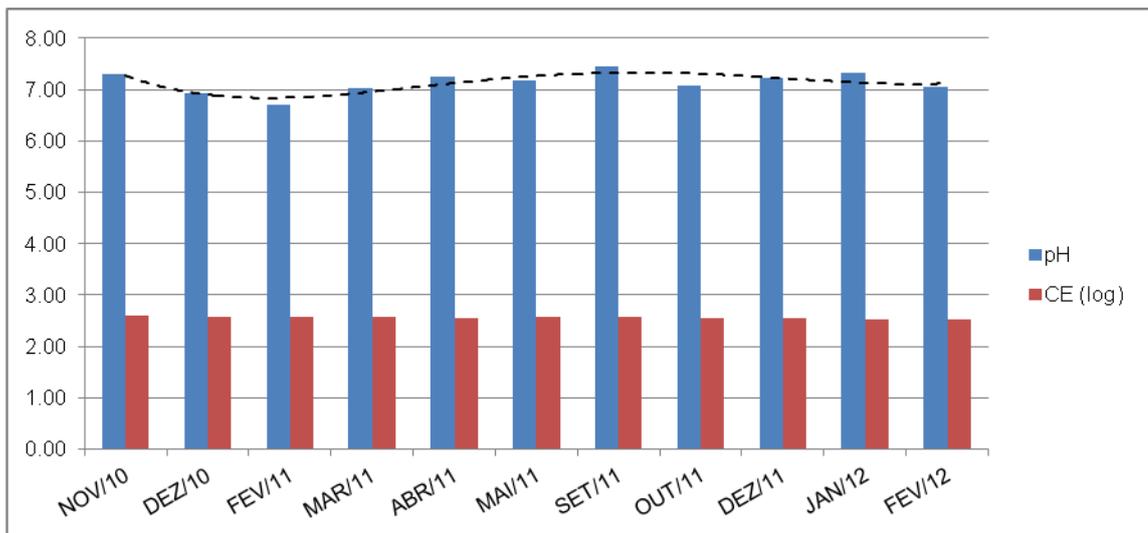


Figura 4.6 - Valores médios de pH e CE (em $\mu\text{S}/\text{cm}$) obtidos nos monitoramentos *in situ*.

Esses resultados comprovam que as concentrações iônicas das águas em estudo independem do volume hídrico contido no aquífero. Por outro lado, os processos geoquímicos são extremamente relevantes na definição dessas concentrações.

A espacialização das classes de condutividade (Figura 4.6) demonstra que as maiores concentrações iônicas ocorrem nos ambientes em que a Sequência Meta Vulcanossedimentar de Palmeirópolis está presente, reproduzindo, inclusive, os picos observados na Figura 4.7. Esse fato resulta da diversidade litológica desse ambiente, onde alguns tipos petrográficos apresentam elevado potencial para processos geoquímicos com efeitos diretos sobre as águas subterrâneas. Dentre esses tipos, destacam-se: mica xisto calcífero com veios de quartzo e carbonato; mármore impuro; e anfibolito fino (metabasalto), com presença de sulfeto disseminado.

Quanto aos cátions, o cálcio e o magnésio foram os que apresentaram maior influência na matriz iônica das águas. Essa influência é comprovada pelos coeficientes de correlação entre esses elementos e a condutividade elétrica (Tabela 4.2).

Comportamento similar é citado por Gastmans *et al.* (2010), em estudos realizados na porção norte do Sistema Aquífero Guarani. Naquela condição foi identificada relação quase linear entre o cálcio e os aumentos do TDS.

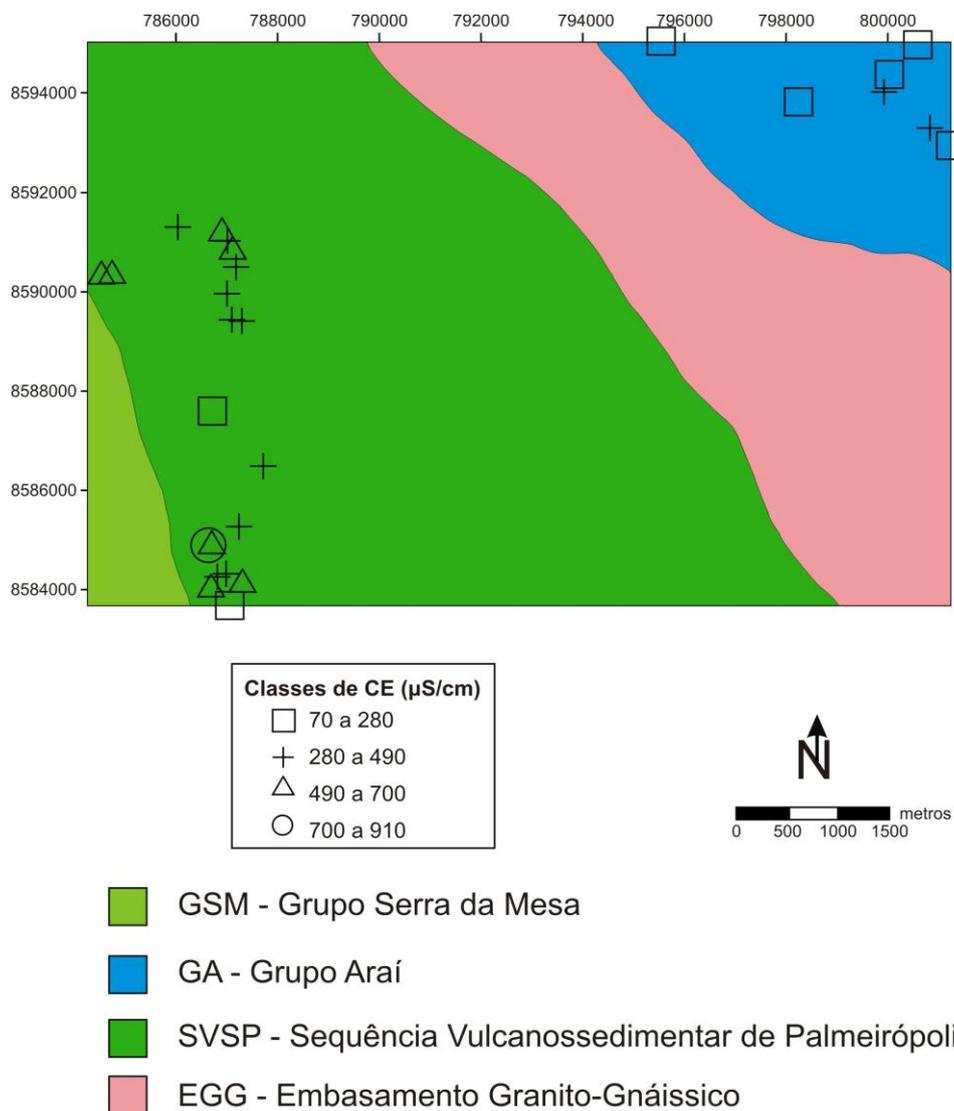


Figura 4.7 - Espacialização das classes de condutividade elétrica dos sítios amostrais.

Tabela 4.2 - Coeficientes de correlação entre a condutividade elétrica e os principais cátions.

Período Chuvoso							Período Seco						
	CE	Ca	Mg	Si	Na	K		CE	Ca	Mg	Si	Na	K
CE	1						CE	1					
Ca	0,69	1					Ca	0,89	1				
Mg	0,83	0,40	1				Mg	0,83	0,69	1			
Si	-0,30	-0,42	-0,21	1			Si	-0,06	-0,11	0,01	1		
Na	0,11	-0,12	0,04	0,49	1		Na	0,24	0,06	0,13	0,62	1	
K	0,29	0,27	0,09	0,16	0,29	1	K	0,45	0,35	0,12	0,09	0,37	1

No período chuvoso, as concentrações médias foram 47,32 mg/L para cálcio e 15,55mg/L para magnésio, enquanto no período seco foram de 46,15 mg/L de cálcio e 15,75mg/L de magnésio (Figuras 4.8 e 4.9). As variações nas concentrações médias desses elementos, considerando a sazonalidade climática, também não apresentaram diferença significativa.

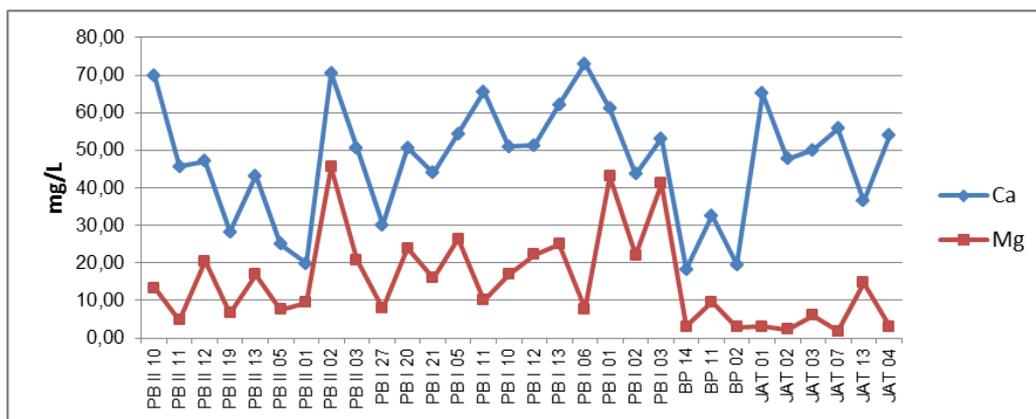


Figura 4.8 - Teores de cálcio e magnésio durante o período chuvoso.

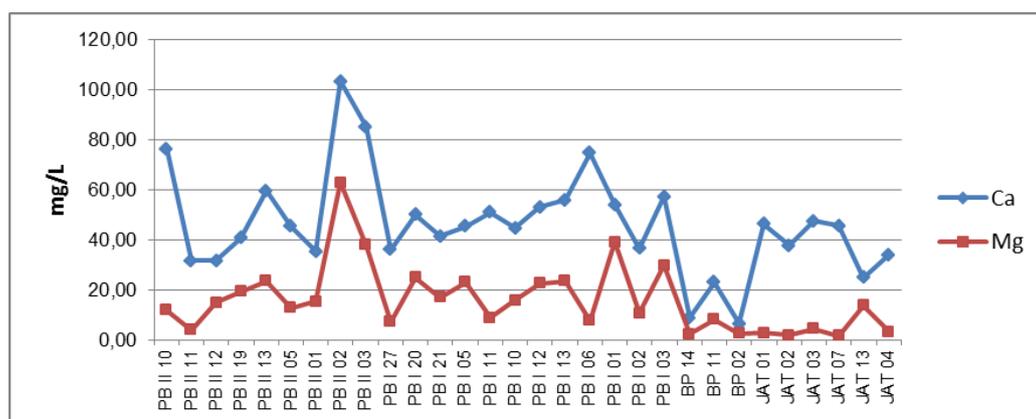


Figura 4.9 - Teores de cálcio e magnésio durante o período seco.

O sódio foi o único elemento que apresentou variação significativa nas concentrações em relação às épocas do ano, ou seja, 6,14 mg/L durante as chuvas e 3,81 mg/L na seca. Esse fato decorre da mobilidade desse elemento e da possibilidade de troca iônica com o cálcio. Por outro lado, essas variações nas concentrações de sódio não foram suficientes para elevar o coeficiente de correlação com a condutividade elétrica (Tabela 4.2).

Quanto aos ânions, a maior relevância é do bicarbonato, cujo coeficiente de correlação com a condutividade elétrica chega a 0,94 (Tabela 4.3).

Tabela 4.3 - Coeficientes de correlação entre a condutividade elétrica e os principais ânions.

Período Chuvoso							Período Seco						
	CE	F	Cl	NO3	SO4	HCO3		CE	F	Cl	NO3	SO4	HCO3
CE	1						CE	1					
F	0,55	1					F	0,53	1				
Cl	0,19	0,04	1				Cl	-0,29	0,20	1			
NO3	0,05	0,05	-0,07	1			NO3	0,06	0,10	0,35	1		
SO4	0,16	0,36	0,47	-0,13	1		SO4	0,34	0,34	-0,08	-0,15	1	
HCO3	0,92	0,62	0,00	0,01	0,28	1	HCO3	0,94	0,44	-0,32	-0,10	0,30	1

As concentrações médias do bicarbonato foram de 210,9 mg/L no período chuvoso e de 220,9 mg/L no período seco. Já as concentrações dos sítios amostrais mostraram variações de 60,33 a 536,40mg/L, durante as chuvas, e de 43,35 a 549,87mg/L, durante a seca (Figura 4.10).

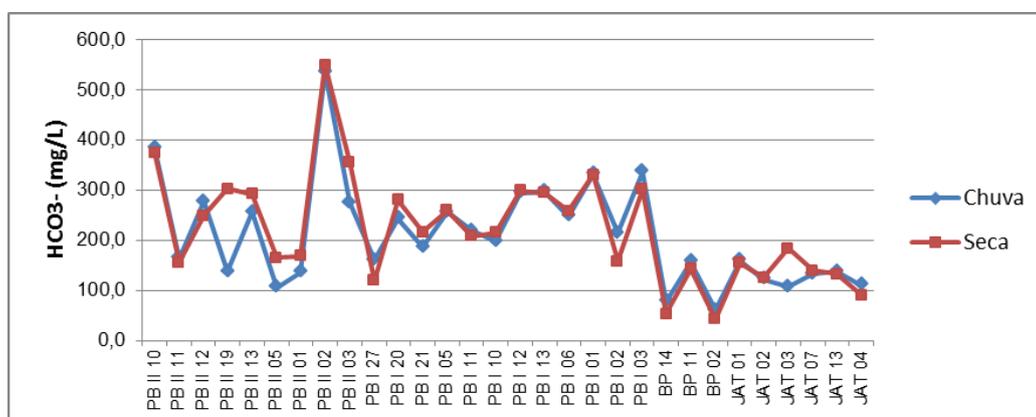


Figura 4.10 - Variações do íon bicarbonato considerando a sazonalidade climática.

Os demais ânions são pouco representativos, excetuando algumas concentrações de nitrato e de sulfato. O primeiro indica os efeitos da antropização na região, sendo que os limites de 10 ppm, estabelecidos na Resolução CONAMA 286/05 e na Portaria do Ministério da Saúde 2914/2011, foram superados nos poços PB II-03, PB II-05 e PB I-10, durante a estação chuvosa, e PB I-02, PB I-03 e JAT-04, na estação seca. O segundo é originário de sulfetos disseminados em rochas que compõem a geologia local, principalmente metabasaltos, sendo mais expressivos nos sítios amostrais PB II-10 e PB II-12.

A Figura 4.11 reproduz as concentrações médias dos constituintes principais da matriz iônica das águas.

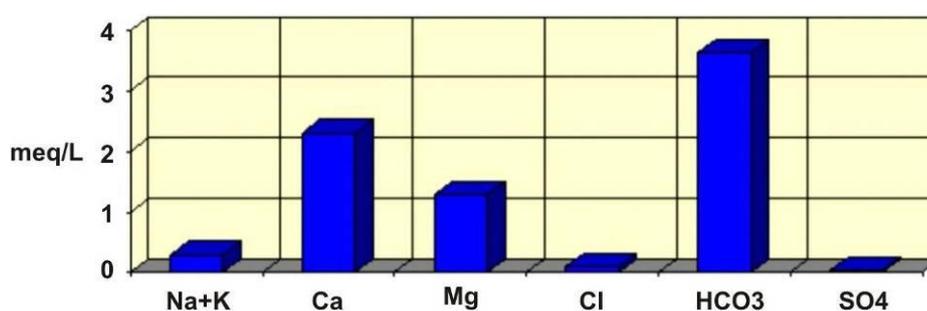


Figura 4.11 - Concentrações médias dos principais íons.

Notadamente, o cálcio e o magnésio são os cátions de maior correlação com o ânion bicarbonato (Tabela 4.4).

Embora os valores elevados de pH limitem a ocorrência de CO₂ livre nos domínios das águas subterrâneas, a determinação desse parâmetro teve como finalidade auxiliar na avaliação do equilíbrio químico das águas.

A concentração média de CO₂ atingiu 20,90 mg/L no período chuvoso e 18,47 mg/L no período seco.

A consolidação dos resultados analíticos provenientes de duas campanhas, do período chuvoso e do período seco, é apresentada nas Tabelas 4.5 e 4.6.

Tabela 4.4 - Coeficientes de correlação dos constituintes principais das águas estudadas.

Período Chuvoso								Período Seco							
	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	HCO ₃		Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	HCO ₃
Ca	1							Ca	1						
Mg	0,40	1						Mg	0,69	1					
Na	-0,12	0,04	1					Na	0,06	0,13	1				
K	0,27	0,09	0,29	1				K	0,35	0,12	0,37	1			
Cl	-0,33	-0,25	0,08	0,29	1			Cl	-0,24	-0,22	-0,03	0,13	1		
SO ₄	0,22	0,10	0,27	0,79	-0,08	1		SO ₄	0,17	0,02	0,40	0,77	-0,08	1	
HCO ₃	0,58	0,76	-0,04	0,31	-0,32	0,30	1	HCO ₃	0,88	0,87	0,17	0,42	-0,32	0,30	1

4.3 Classificação Hidroquímica

A classificação hidroquímica visou tão somente complementar a interpretação dos resultados analíticos no tocante à importância dos íons de cálcio, magnésio e bicarbonato no sistema, uma vez que até então esses foram considerados como os principais constituintes da matriz iônica das águas em estudo.

Para tanto, utilizou-se dos mesmos resultados analíticos, porém, tomando-se o cuidado de considerar o erro padrão e o erro teórico para as amostras (Anexos V-A e V-B), conforme metodologia de Logan (1965).

Foram observadas equivalências entre cátions e ânions em 53,33% das amostras de período seco. Para as amostras de período chuvoso, esse percentual ficou em 30%.

Cabe salientar que a ocorrência de maiores erros analíticos em época chuvosa é bastante comum, tendo em vista a constante disponibilização de novos íons às águas subterrâneas, decorrentes dos processos de infiltração e recarga. Ademais, conforme já discutido no âmbito da fundamentação teórica deste capítulo, as reduções no pH do sistema, provocadas pela entrada de água de chuva, fazem com que haja ligeira diminuição da concentração do ânion bicarbonato, em detrimento da concentração de CO₂ dissolvido (Figura 4.1).

Mesmo assim, visando à máxima segurança no emprego dos dados, o procedimento de classificação foi baseado apenas nas amostras em que o erro padrão de análise foi inferior ao erro teórico (Figuras 4.12 e 4.13). O resultado foi a classificação das águas como bicarbonatadas, referendando classificação anterior realizada por Souza (2008). Com relação ao cátion predominante, a maioria dos pontos se concentrou no campo das águas cálcicas.

Tabela 4.5 - Resultados analíticos da primeira campanha (Período Chuvoso).

Amostra	Sítio	pH	C.E. µs/cm	mg/L ou ppm												
				Ca	Mg	Fe	Si	Al	Na	K	F	Cl	NO3	SO4	HCO3	CO2
1	PB II -10	6,95	601	69,71	13,33	0,04	13,67	0,30	10,92	25,30	0,53	5,71	0,00	9,68	384,9	24,60
2	PB II -11	6,9	293	45,69	4,83	0,03	15,02	0,35	5,98	4,51	0,14	0,85	0,90	2,69	164,7	11,60
3	PB II -12	7,33	242	47,05	20,41	0,03	18,92	0,37	17,11	12,78	0,30	1,47	0,34	11,33	277,6	5,60
4	PB II -19	6,97	114	28,28	6,71	0,06	17,76	0,35	6,17	3,94	0,14	0,78	0,80	1,53	137,0	4,90
5	PB II -13	6,43	462	43,21	16,96	0,03	17,93	0,33	15,74	3,35	0,13	2,44	3,86	1,49	256,8	56,00
6	PB II -05	6,68	213	25,04	7,54	0,05	14,76	0,46	3,39	2,11	0,19	2,81	10,10	1,97	106,3	8,45
7	PB II -01	6,47	258	19,88	9,40	0,02	18,77	0,39	8,98	2,31	0,11	0,67	0,90	1,12	136,4	21,12
8	PB II -02	6,65	882	70,57	45,59	0,03	10,60	0,48	8,49	8,91	0,42	1,62	2,71	2,19	536,4	52,80
9	PB II -03	6,57	511	50,61	20,81	0,03	7,93	0,48	2,42	4,89	0,25	1,94	10,89	1,60	274,7	49,00
10	PB I - 27	6,72	272	30,20	7,87	0,03	9,01	0,60	2,63	13,39	0,32	1,11	2,13	2,03	161,1	24,60
11	PB I - 20	6,67	443	50,65	23,92	0,05	8,98	0,05	2,46	4,19	0,23	1,01	1,24	3,14	243,1	35,20
12	PB I - 21	6,5	329	43,99	15,93	0,03	7,28	<LQ	1,44	3,09	0,17	0,59	1,02	1,93	186,8	16,50
13	PB I - 05	6,77	450	54,44	26,33	0,04	7,91	<LQ	2,30	3,87	0,51	1,02	1,05	2,26	256,6	16,20
14	PB I - 11	6,92	390	65,64	10,10	0,02	9,53	<LQ	2,96	5,61	0,61	1,16	1,51	0,75	218,6	4,90
15	PB I - 10	6,64	373	50,93	16,87	0,02	9,76	0,06	1,59	4,26	0,25	1,28	12,76	0,45	198,5	21,10
16	PB I - 12	6,69	403	51,27	22,18	0,02	14,02	<LQ	2,34	6,00	0,20	1,04	0,63	1,47	294,8	17,20
17	PB I - 13	6,55	515	62,22	25,00	0,03	13,37	<LQ	5,51	5,58	0,28	1,55	0,00	0,45	296,6	30,60
18	PB I - 06	6,62	444	73,00	7,76	0,03	10,33	<LQ	1,74	3,19	0,16	0,44	0,00	0,65	247,8	35,20
19	PB I - 01	6,5	616	61,03	42,98	0,09	6,18	0,15	3,93	3,07	0,16	1,30	0,00	0,12	332,2	60,00
20	PB I - 02	6,86	528	43,58	22,04	0,02	8,06	<LQ	26,70	4,44	0,28	12,80	0,00	10,31	214,2	7,40
21	PB I - 03	7,26	610	53,17	41,11	0,02	9,35	<LQ	3,57	3,54	0,39	0,84	0,00	0,75	336,8	6,30
22	BUP - 14	6,18	140	18,25	3,03	0,03	19,81	<LQ	7,03	3,86	0,15	0,43	0,58	0,72	78,2	16,20
23	BUP - 11	6,6	276	32,61	9,58	0,03	23,00	0,04	24,05	5,15	0,20	0,75	0,53	0,90	157,4	10,50
24	BUP - 02	6,18	140,5	19,59	2,89	0,06	8,56	0,19	2,43	2,81	0,07	1,46	0,00	1,02	60,3	8,80
25	JAT - 01	7,39	309	65,17	3,02	0,04	7,71	0,10	3,62	2,89	0,12	2,53	0,00	1,22	159,8	5,60
26	JAT - 02	7,42	226	47,71	2,36	0,03	5,90	0,07	0,81	1,37	0,08	0,55	0,74	0,30	122,4	5,20
27	JAT - 03	6,87	262	50,01	6,02	0,04	7,92	0,10	1,58	1,60	0,08	0,91	0,00	0,61	107,4	11,90
28	JAT - 07	6,99	252	55,85	1,75	0,03	11,74	0,11	1,24	2,90	0,08	0,59	1,36	1,45	132,6	7,00
29	JAT - 13	6,5	276	36,43	14,69	0,03	8,10	0,15	0,82	2,56	0,17	0,65	0,00	0,58	137,5	38,70
30	JAT - 04	6,75	314	53,86	3,04	0,04	9,60	0,16	17,60	8,72	0,08	12,62	0,00	1,02	110,1	13,70

LQ = Limite de Quantificação

Tabela 4.6 - Resultados analíticos da segunda campanha (Período Seco).

Amostra	Sítio	pH	C.E. µs/cm	mg/L ou ppm												
				Ca	Mg	Fe	Si	Al	Na	K	F	Cl	NO3	SO4	HCO3	CO2
1	PB II -10	7,81	688	76,50	11,80	<LQ	12,82	<LQ	8,07	27,47	0,58	3,01	0,06	16,55	374,7	7,04
2	PB II -11	7,57	281	31,64	3,84	<LQ	12,10	<LQ	3,84	3,83	0,11	0,49	1,04	2,46	155,6	14,08
3	PB II -12	8,21	464	31,68	14,75	<LQ	13,78	<LQ	8,29	8,85	0,35	0,60	0,00	16,36	248,8	6,69
4	PB II -19	7,72	248	40,82	19,24	<LQ	10,20	<LQ	2,72	6,56	0,18	4,72	0,18	1,39	303,3	7,04
5	PB II -13	7,14	511	59,61	23,46	<LQ	21,06	0,26	10,35	3,63	0,25	3,86	2,74	1,33	291,9	38,72
6	PB II -05	7,94	302	45,46	12,84	<LQ	18,14	<LQ	4,22	2,47	0,22	5,76	1,98	1,45	164,9	5,28
7	PB II -01	7,17	287	35,39	15,29	<LQ	24,92	<LQ	7,14	2,72	0,11	1,98	1,52	1,03	168,4	29,92
8	PB II -02	7,43	906	103,61	62,98	<LQ	13,38	<LQ	6,45	8,13	0,40	1,36	0,05	1,84	549,9	40,48
9	PB II -03	7,36	602	85,30	37,98	<LQ	9,73	<LQ	2,28	5,14	0,27	1,86	5,29	1,55	357,1	30,27
10	PB I - 27	7,24	233	36,09	7,12	<LQ	10,86	<LQ	1,77	8,67	0,59	22,98	9,22	2,11	119,8	18,30
11	PB I - 20	7,53	429	50,11	25,00	<LQ	8,11	0,08	2,34	4,73	0,26	1,15	1,58	3,55	280,6	17,95
12	PB I - 21	7,48	375	41,42	16,91	<LQ	7,03	<LQ	1,60	3,72	0,33	0,92	0,73	2,06	216,8	20,77
13	PB I - 05	7,50	454	45,42	23,11	<LQ	6,86	<LQ	2,52	4,11	0,62	3,07	0,69	2,04	260,3	22,18
14	PB I - 11	7,53	373	50,97	8,79	<LQ	8,07	<LQ	2,61	4,98	0,55	0,69	1,39	0,51	208,5	10,56
15	PB I - 10	7,44	381	44,61	15,75	<LQ	8,59	<LQ	1,54	4,27	0,19	1,32	2,70	0,48	215,5	19,36
16	PB I - 12	7,63	511	53,19	22,57	<LQ	12,14	<LQ	4,76	5,72	0,38	2,97	2,76	0,62	300,0	10,56
17	PB I - 13	7,17	521	55,93	23,53	<LQ	12,71	<LQ	4,71	5,68	0,33	2,84	2,61	0,51	295,2	33,09
18	PB I - 06	7,44	460	74,70	7,59	<LQ	11,36	<LQ	1,68	3,71	0,44	1,76	0,89	1,87	258,4	4,58
19	PB I - 01	7,44	645	53,96	39,17	<LQ	5,97	<LQ	3,38	3,71	0,48	2,45	38,34	0,52	331,4	17,60
20	PB I - 02	7,85	321	36,57	10,73	<LQ	7,52	<LQ	4,27	5,68	0,36	3,58	15,34	1,43	157,9	20,77
21	PB I - 03	7,88	514	57,30	29,69	<LQ	9,17	<LQ	1,87	3,46	0,26	0,93	1,21	2,28	302,0	7,04
21	BP - 14	6,81	89,1	8,69	2,31	<LQ	20,36	<LQ	9,93	3,06	0,12	0,61	0,16	0,00	52,7	7,74
22	BP - 11	7,39	255	23,13	8,04	<LQ	21,34	<LQ	2,00	5,53	0,18	4,13	0,84	0,63	143,6	24,99
24	BP - 02	6,75	72,8	6,43	2,46	<LQ	11,95	<LQ	1,97	2,58	0,15	11,61	0,56	0,28	43,4	14,43
25	JAT - 01	7,39	286	46,43	2,75	<LQ	5,51	<LQ	2,39	1,21	0,14	0,96	3,65	0,92	155,1	15,49
26	JAT - 02	7,76	226	37,70	1,86	<LQ	4,69	<LQ	0,43	0,73	0,19	0,24	0,37	0,23	125,3	5,63
27	JAT - 03	7,49	339	47,53	4,47	0,15	7,20	<LQ	1,72	2,95	0,27	1,24	0,00	0,00	184,3	16,19
28	JAT - 07	7,46	263	45,61	1,49	<LQ	9,71	<LQ	1,61	2,17	0,13	4,24	2,79	1,36	139,4	13,38
29	JAT - 13	6,78	249	24,85	13,60	<LQ	6,42	<LQ	0,63	2,85	0,26	0,50	1,44	0,54	132,7	49,28
30	JAT - 04	6,98	292	33,95	3,24	<LQ	6,95	<LQ	7,13	5,71	0,21	12,13	49,47	0,71	90,6	24,64

LQ = Limite de Quantificação

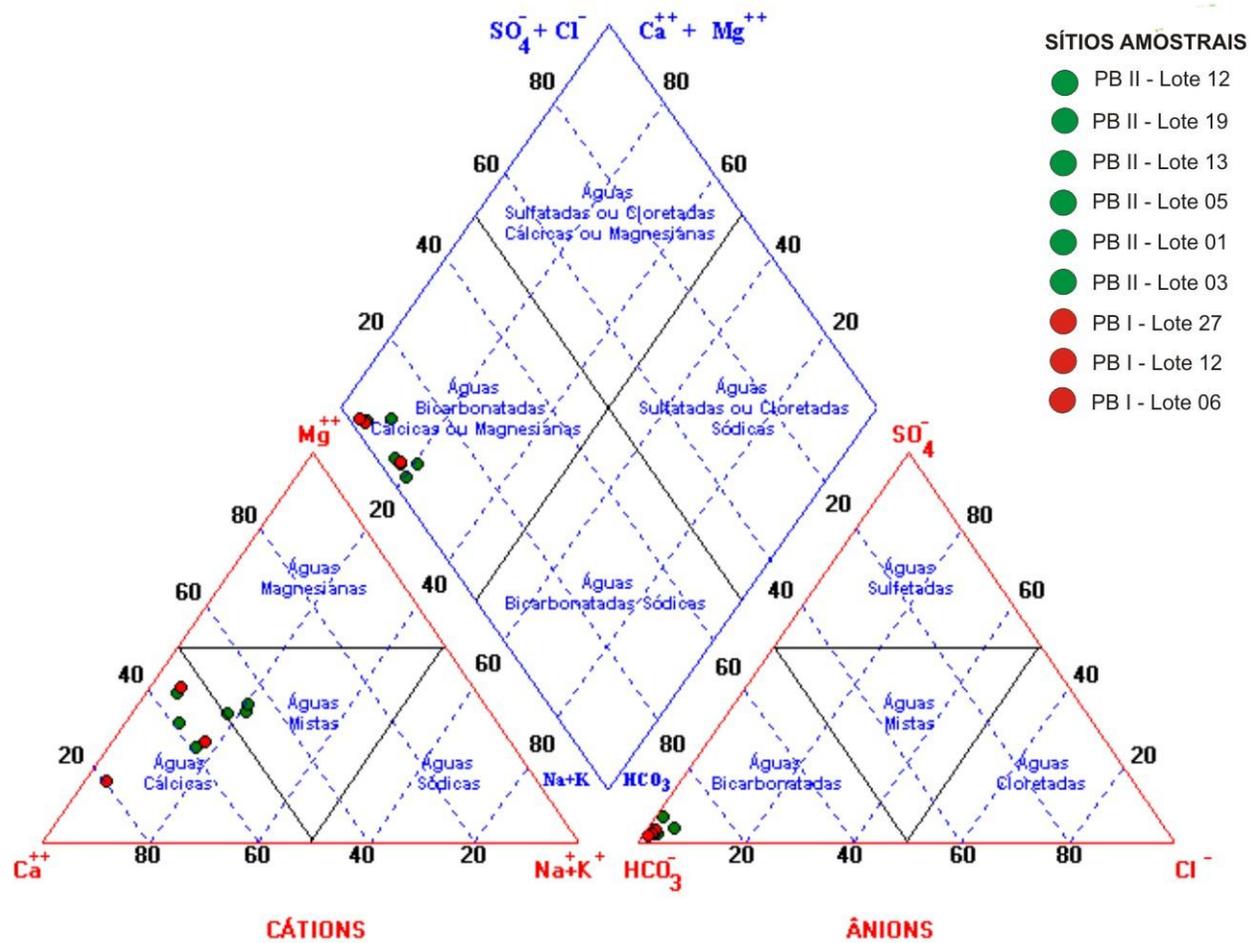


Figura 4.12 - Diagrama de Piper com a classificação das durante o período chuvoso (amostras com erro padrão < erro teórico).

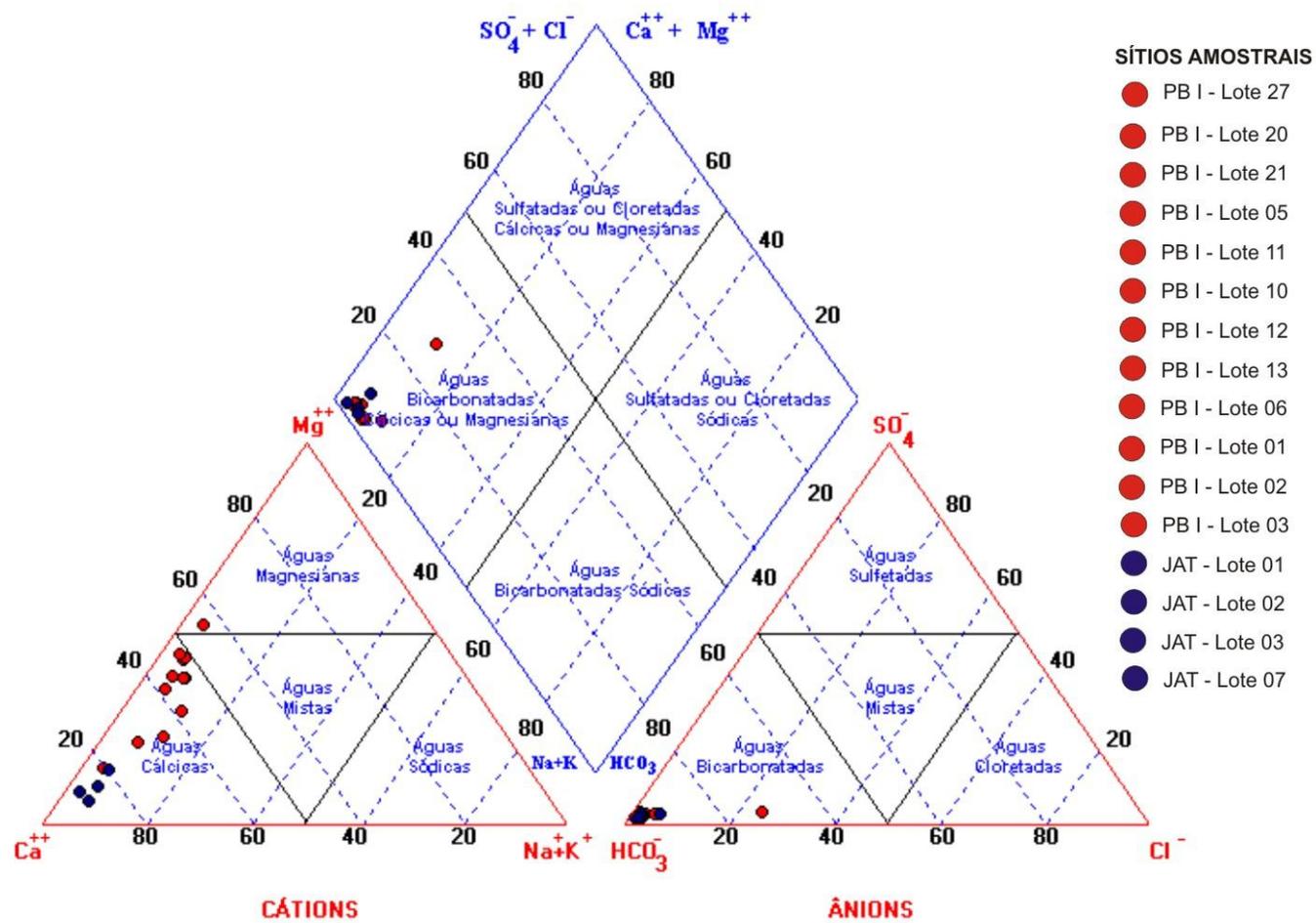


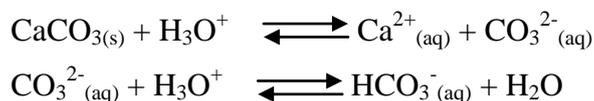
Figura 4.13 - Diagramas de Piper com a classificação das durante o período seco (amostras com erro padrão < erro teórico).

4.4 Equilíbrio Químico do Sistema

Os resultados analíticos provenientes das campanhas de período chuvoso e seco demonstraram elevada capacidade de equilíbrio químico do ambiente de ocorrência das águas em estudo, condição essa responsável pela manutenção dos mesmos patamares de condutividade elétrica, durante as diferentes épocas do ano.

As elevações nos volumes dos aquíferos, com consequente diminuição dos valores médios de pH, não são seguidas de variações nas concentrações iônicas do sistema. O predomínio dos íons bicarbonato e cálcio faz com que as referidas águas sejam sensíveis aos mecanismos de tamponamento químico, os quais são definidos pelos processos de solubilização ou precipitação do carbonato de cálcio.

Com a hipótese de solubilização do CaCO_3 , cuja constante de solubilidade - k_{ps} é $4,6 \cdot 10^{-9} = [\text{Ca}^{2+}] \cdot [\text{CO}_3^{2-}] / [\text{CaCO}_3]$, tem-se como resultado a disponibilização de íons bicarbonato:



Pelo fato do bicarbonato integrar a primeira dissociação do ácido carbônico em água (constante de dissociação - $k_{a1} = 4,3 \cdot 10^{-7}$), ou seja, $\text{H}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{HCO}_3^{-}_{(aq)} + \text{H}_3\text{O}^+$, é possível estimar o pH de equilíbrio entre solubilização e precipitação do carbonato de cálcio por meio de adaptação da equação de Henderson-Hasselbach, onde:

$$\text{pH} = \text{pk}_a + \log \frac{[\text{sal}]}{[\text{H}_2\text{CO}_3]}$$

Sendo a concentração média do cálcio 10^{-3} Mol/L e do ácido carbônico (equivalente à concentração do CO_2 dissolvido) 10^{-3} Mol/L, tem-se:

$$\text{pH} = -\log 4,3 \cdot 10^{-7} + \log \frac{10^{-3}}{10^{-3,3}} = 6,66$$

A presença de enxofre no sistema (forma oxidada), mesmo que em concentrações inferiores às do cálcio (na ordem de 10^{-5} Mol/L), faz com que também ocorra processos de solubilização e precipitação do CaSO_4 .

O equilíbrio desse sal em água pode ser representado pela seguinte equação de formação do íon bissulfato:



Considerando que essa especiação representa o equilíbrio teórico do íon bissulfato na água ($\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{HSO}_4^{-}_{(aq)} + \text{H}_3\text{O}^+$), considerando que uma eventual dissociação do CaSO_4 só vai ocorrer em valores de produto iônico (k) imediatamente inferiores à constante de solubilidade (k_{ps}) desse sal ($k_{ps} = 3,0 \cdot 10^{-5}$), e, ainda, admitindo-se equivalência nas

concentrações dos íons provenientes da dissolução do sulfato de cálcio e da dissociação ácida, a equação $\text{Ca}^{2+}_{(\text{aq})} + \text{SO}_4^{2-}_{(\text{aq})} \rightleftharpoons \text{CaSO}_{4(\text{s})} + \text{H}_2\text{O}$ pode ter o pH de equilíbrio calculado a partir da seguinte aproximação:

$$3,0 \cdot 10^{-5} = \frac{[\text{SO}_4^-] \cdot [\text{H}_3\text{O}^+]}{[\text{HSO}_4^-]}, \text{ onde } [\text{SO}_4^-] = [\text{H}_3\text{O}^+] = [\text{H}^+]$$

$$3,0 \cdot 10^{-5} = \frac{[\text{H}^+] \cdot [\text{H}^+]}{[\text{HSO}_4^-]}$$

$$[\text{H}^+] = (3,0 \cdot 10^{-10})^{1/2} = 1,7 \cdot 10^{-5}, \text{ donde } \text{pH} = -\log [\text{H}^+] = 4,76$$

Na Figura 4.14 é apresentada uma aproximação dos valores de pH correspondentes aos equilíbrios do sistema Ca-C-S-O-H das águas em estudo, representados na forma de diagrama de Eh -pH.

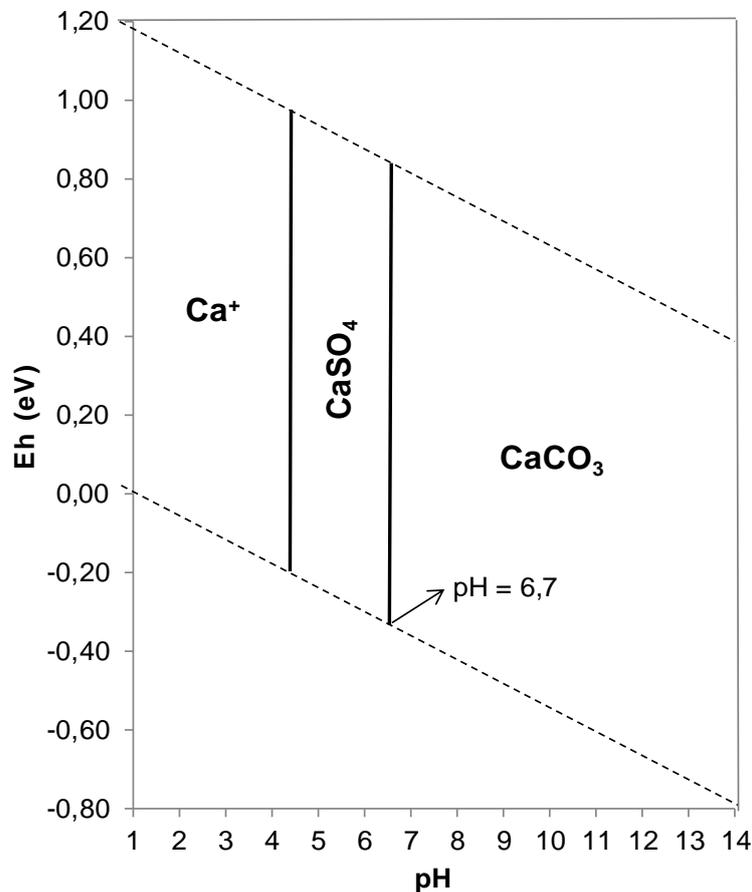


Figura 4.14- Diagrama de Eh x pH do sistema Ca-C-S-O-H ($\text{Ca} = 10^{-3}$, $\text{C} = 10^{-3,3}$ e $\text{S} = 10^{-5}$).

Portanto, os menores valores de pH, provocados pelo maior aporte de água no sistema durante o período das chuvas, são seguidas de disponibilizações de íons cálcio e bicarbonato, conforme a seguinte reação:



Embora parte do cálcio ionizado tenha condições de ser novamente precipitado na forma de sulfato de cálcio, o ânion bicarbonato permanece em solução, contribuindo para o equilíbrio de pH e para a manutenção dos valores da condutividade elétrica nos mesmos patamares da época da seca.

A redução nos valores de pH possibilita a troca iônica, mesmo que incipiente, entre o cálcio em solução e o sódio adsorvido (Dever, 1988). Esse mecanismo justifica a ligeira elevação dos teores de sódio no período chuvoso.

Quando cessado o aporte de água de chuva, os valores de pH tendem a se elevar e, como consequência, retorna-se ao processo de precipitação de carbonato de cálcio.

O material recolhido em fundo de caixa d'água nos domínios das áreas de estudo (Figura 4.15) ilustra bem o processo de precipitação da calcita (CaCO_3).



Figura 4.15 - Precipitado de calcita obtido da limpeza periódica de caixa d'água.

CAPÍTULO V

MODELO CONCEITUAL DE FLUXO: MECANISMOS DE RECARGA

5.1 Fundamentação Teórica

Os estudos de fluxos subterrâneos são dependentes do conhecimento de algumas propriedades físicas do sistema aquífero, particularmente, a porosidade, condutividade hidráulica, transmissividade e carga hidráulica.

A porosidade de um solo ou rocha pode ser definida como a relação entre o volume de vazios e o volume total (Feitosa & Filho, 2000; Fetter, 2001). Normalmente é classificada em porosidade primária, relacionada aos vazios das rochas sedimentares ou de solo, e em porosidade secundária, quando relacionada a fraturas e fissuras em rochas cristalina ou aos espaços provocados por dissolução de rochas carbonáticas (aquíferos cársticos).

A condutividade hidráulica, expressa por uma dimensão de distância dividida por uma dimensão de tempo (ex. m/s), representa um coeficiente de proporcionalidade (K) que depende das características do meio, incluindo, porosidade, tamanho, distribuição, forma e arranjo das partículas, além da viscosidade e massa específica do fluido (Feitosa *et al.*, 2008). Sob o ponto de vista prático, representa à maior ou menor facilidade de um determinado meio em conduzir água.

O quantitativo da água transmitida horizontalmente por toda a espessura saturada do aquífero corresponde à transmissividade (Feitosa *et al.*, 2008), que é expressa por uma dimensão de distância ao quadrado dividida por uma dimensão de tempo, por exemplo, m²/s. Essa unidade é decorrente da relação entre vazão dividida pela área e multiplicada pela espessura (ex. m³/s dividido por m² multiplicado por m).

A carga hidráulica indica o nível de energia em que a água se encontra, sendo representada pelo somatório da carga por elevação (altura piezométrica) e da carga por pressão exercida sobre o sistema (Fetter, 2001). Em aquíferos como os das áreas de estudo, ou seja, não confinados ou livres, a carga na superfície freática corresponde ao próprio nível potenciométrico.

Para domínios porosos, como é o caso das áreas de estudo, Press *et al.* (2008) resumem que o fluxo subterrâneo é função direta dos valores de condutividade hidráulica do sistema, do gradiente hidráulico e da porosidade efetiva.

As avaliações relativas à recarga de aquíferos envolvem diversos fatores, sejam eles de natureza abiótica (solo, litologia, hidrogeologia, clima, uso/ocupação) ou biótica (cobertura vegetal, atividade microbiológica do solo).

Estudos realizados por Jie *et al.* (2011) além de considerarem a influência de fatores regionais (clima), destacam os solos, os usos da terra e a hidrogeologia como fatores locais de relevante importância e complexidade nos processos de recarga.

De acordo com Vries *et al.* (2002), nem toda a água disposta no sistema de recarga atinge, necessariamente, o aquífero freático. Essa diferença pode ser dificultada pela baixa condutividade hidráulica de alguns horizontes pedológicos, que resultam em perdas decorrentes de interfluxo que se estabelece nas interfaces entre camadas com contraste de permeabilidade, as quais podem resultar em aumento de evapotranspiração ou mesmo alimentar nascentes de contato de natureza efêmera. Tal entendimento reforça a importância da variável pedologia nos estudos sobre recarga.

Fitzsimons & Misstear (2006) discorrem sobre a problemática de se limitar os estudos relativos a taxas de recarga nas propriedades dos solos, em detrimento de uma melhor compreensão conceitual da geologia. Os autores admitem esse tipo de metodologia, porém até uma determinada espessura do solo, onde os valores de permeabilidade são mais expressivos.

O comportamento da distribuição de umidade na zona vadosa é função das propriedades físicas dos horizontes superficiais e subsuperficiais, especialmente, da condutividade hidráulica, a qual é fortemente controlada pela textura e estrutura dos solos.

Reichardt (1990) explica que a movimentação da água no solo ocorre por diferenças de potencial gravitacional, de umidade, de pressão e matricial (capilaridade e adsorção), sendo que a máxima condutividade hidráulica só é obtida em ambiente saturado. Portanto até que se obtenha a condição de saturação, a infiltração da água no solo se dá em várias direções, caracterizando um sistema de movimentação tridimensional.

A Figura 5.1 ilustra as formas de distribuição e perda de água no solo, desde a interceptação da precipitação até o processo de recarga do sistema freático.

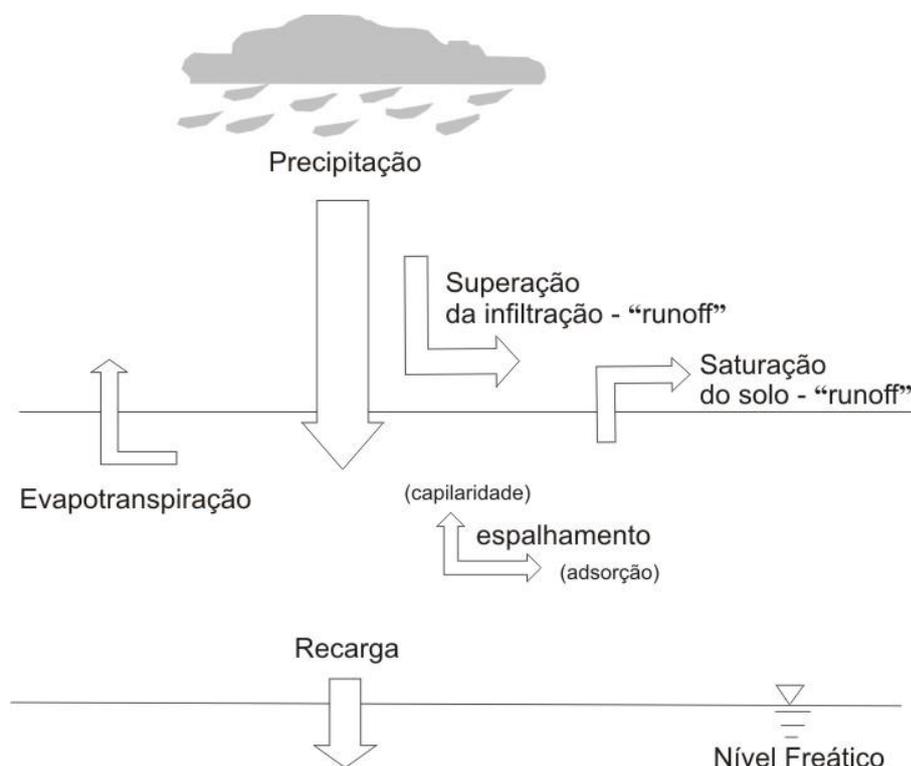


Figura 5.1 - Distribuição da água na zona vadosa (adaptado de Yeh *et al.*, 2005).

O emprego de avaliações potenciométricas tem se difundido como uma das técnicas mais comuns de avaliação quantitativa dos processos de recarga.

Suhogusoff *et al.* (2002) consideram que o método de avaliação do nível potenciométrico, para condições de monitoramento mensal, apresenta-se mais compatível para a quantificação de recarga de aquíferos, em detrimento do método do balanço hídrico.

Pinto *et al.* (2010), em estudos realizados em Juatuba (MG), consideram que as variações do nível d'água de longo termo, como, por exemplo, ao longo de décadas, podem estar associadas às alterações naturais do clima e às mudanças na ocupação e uso do solo. Consideram, ainda, que variações de um ano podem estar ligadas à sazonalidade da evapotranspiração e precipitação, e variações em curtos períodos de tempo à precipitação, bombeamento, mudanças de pressão atmosférica, entre outros.

A conjugação de informações geológicas, pedológicas, geomorfológicas e climáticas, na forma de modelo conceitual, tende a auxiliar, substancialmente, a compreensão dos processos hidrogeológicos. Suhogusoff *et al.* (2002) avaliam que a utilização de modelo conceitual de fluxo subterrâneo é fundamental para toda e qualquer avaliação referente às águas subterrâneas. Lousada & Campos (2005), consideram que o conhecimento de modelos conceituais de fluxo é essencial para a caracterização das formas de circulação, recarga e descarga dos aquíferos.

5.2 Hidrodinâmica do Sistema

Os meios porosos das áreas de estudo são caracterizados por baixas condutividades hidráulicas, que acabam se traduzindo em restrições de fluxo na zona vadosa e, como consequência, limitando os processos de infiltração em maiores profundidades.

Há uma tendência natural de que a principal componente do processo de infiltração, representada pela componente vertical, seja superada pela resultante da soma vetorial da condutividade hidráulica vertical (K_v) e da condutividade hidráulica horizontal (K_h). Dessa forma, a água proveniente do processo de infiltração é submetida a um maior espalhamento na zona vadosa.

Os ensaios de infiltração realizados, segundo critérios da ABGE (1996), nos sítios amostrais representados pelo lote 13 do reassentamento Piabanha II (PB II-13) e lotes 01 e 04 do reassentamento Jataí (JAT-01 e JAT-04), demonstraram esse tipo de restrição de fluxo em função das classes de solo. Outros dados obtidos por Campos & Seidel (2005) em solos similares da mesma região corroboram esses resultados.

Os Neossolos Flúvicos, desenvolvidos a partir de materiais depositados em ambientes aluvionares, incluindo terraços e paleoterraços (Embrapa, 2006), apresentaram valores de condutividade hidráulica - K_v variando de 10^{-6} m/s, no horizonte superficial, a 10^{-8} m/s, no horizonte subsuperficial (Tabela 5.1). A condutividade do material parental, isto é, dos aluviões não foi avaliada.

Tabela 5.1 - Condutividade hidráulica em Neossolo Flúvico – JAT-01.

P	R	ΔT	h1	h2	K
60,0	0,025	2980	81,5	44,8	$1,3 \cdot 10^{-6}$
80,0	0,025	2980	105,8	67,7	$9,4 \cdot 10^{-7}$
105,0	0,025	2980	167,1	162,3	$6,1 \cdot 10^{-8}$

P=profundidade(cm); R=raio do revestimento(m); h1=coluna inicial(cm); h2=coluna final(cm); Δt =tempo de ensaio(s) e K= cond. hydr.(m/s)

Já as associações Argissolos/Nitossolos, mantiveram valores na ordem de 10^{-7} m/s para o horizonte subsuperficial (Tabela 5.2).

Tabela 5.2 – Condutividade hidráulica em perfil de Argissolo/Nitossolo - PB II-13.

P	R	ΔT	h1	h2	K
120,0	0,025	3870	110,5	102,6	$1,2 \cdot 10^{-7}$
130,0	0,025	3880	167,4	156,3	$1,1 \cdot 10^{-7}$

P=profundidade(cm); R=raio do revestimento(m); h1=coluna inicial(cm); h2=coluna final(cm); Δt =tempo de ensaio(s) e K= cond. hydr.(m/s)

Nos solos cujas feições genéticas migram para os processos de latossolização (“Latosolos”), foram identificados, para diferentes profundidades, valores de Kv na ordem 10^{-7} m/s (Tabela 5.3). É importante salientar que tais “Latosolos” são derivados da pedogênese sobre materiais aluvionares silto-argilosos.

Tabela 5.3 - Condutividade hidráulica em Latossolo pouco desenvolvido – JAT-04.

P	R	ΔT	h1	h2	K
50,0	0,025	3690	61,0	43,0	$5,9 \cdot 10^{-7}$
100,0	0,025	3690	104,2	80,0	$4,5 \cdot 10^{-7}$
140,0	0,025	3715	162,7	111,5	$6,4 \cdot 10^{-7}$

P=profundidade(cm); R=raio do revestimento(m); h1=coluna inicial(cm); h2=coluna final(cm); Δt =tempo de ensaio(s) e K= cond. hydr.(m/s)

Embora não tenham sido realizados ensaios de infiltração nos Cambissolos, estudos realizados por Campos & Fiori (2009) na mesma região diagnosticaram valores de Kv variando de 10^{-7} m/s na superfície a 10^{-8} m/s em profundidades crescentes até 150 cm. O mesmo ocorreu com as pequenas manchas de Neossolos Quartzarênicos, onde esses mesmos autores identificaram Kv variando de 10^{-5} m/s, em camadas superficiais, até 10^{-6} m/s em camadas mais profundas.

O monitoramento de ascensão dos níveis freáticos (Figura 5.2), realizado entre os meses de outubro de 2011 (nível de rebaixamento crítico) e fevereiro de 2012, também auxiliaram no entendimento da hidráulica do sistema.

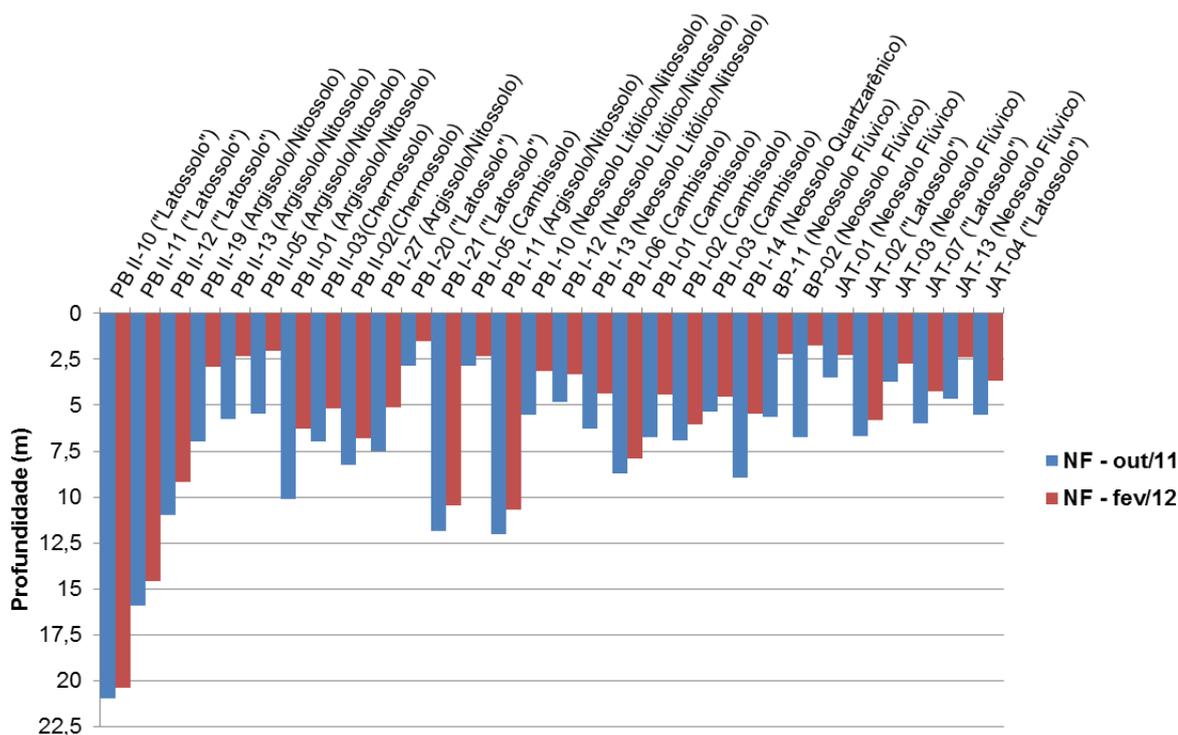


Figura 5.2 - Variação dos níveis freáticos - NF entre Out/11 e Fev/12.

Apesar do mês de fevereiro ainda não representar a elevação máxima do nível freático da região em estudo, os resultados até então obtidos são suficientes para demonstrar que, de maneira geral, as elevações foram mais representativas nos casos em que os níveis freáticos são mais rasos.

Mesmo consideradas as diferentes respostas de elevação do nível freático em função dos tipos de solo, a variação relativamente rápida da maioria dos níveis de água demonstra que os poços das áreas em estudo são abastecidos por sistema de fluxo local, decorrentes da infiltração direta e vertical das águas de chuva.

A curva de variação dos valores de pH (Figura 5.3), onde a média mínima coincide com os meses de maior precipitação pluviométrica, assim como os diferentes valores de condutividade elétrica entre sítios amostrais relativamente próximos (Figuras 4.2, 4.3 e 4.4) auxiliam no fortalecimento do entendimento quanto ao predomínio de fluxo local.

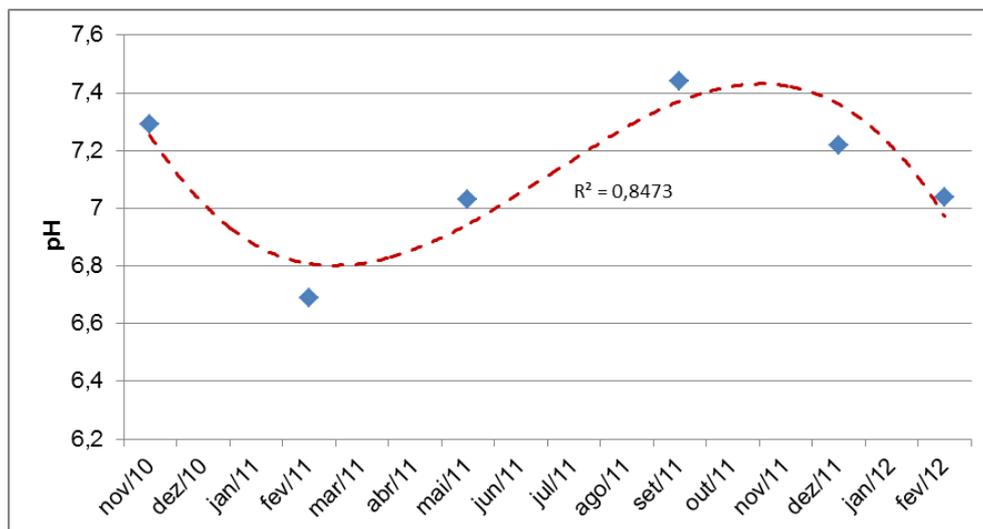


Figura 5.3 - Curva ajustada para os valores médios de pH entre nov/10 e fev/12.

Os fluxos locais ocorrem em áreas com menor altitude e em ambiente caracterizado por regolito (solo e saprolito).

Testes de bombeamento, realizados em poços situados nas proximidades dos locais em que foram desenvolvidos os ensaios de infiltração, auxiliaram na avaliação da transmissividade dos aquíferos rasos. O aquífero hospedado em solo com desenvolvimento a partir de processos de latossolização apresentou valor na ordem de $9,75 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, enquanto, os Neossolos Flúvicos e a associação de Nitossolo e Argissolo apresentaram valores, respectivamente de $2,3 \times 10^{-3}$ e de $1,3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

Os valores de transmissividade elevados e relativamente próximos decorrem, possivelmente, da similaridade dos aquíferos desenvolvidos em ambiente pedológico com textura silto-argilosa. A pequena variação nos valores também é devida aos parâmetros

considerados para a estimativa da transmissividade, incluindo aquíferos livres, heterogêneos em poços de 0,5 metros de diâmetro, parcialmente penetrantes e com 30 metros de espessura saturada.

Em que pese o fato de não ter havido avaliação aprofundada sobre os sistemas de fluxo regional, o que demandaria, por exemplo, estudos de isótopos estáveis ou datação de águas, os condicionantes ambientais (relevo, geologia e pedologia) sugerem que esses tipos de fluxo são caracterizados pela movimentação das águas que infiltram em locais de maior altitude. Nesses casos a percolação através de diversos tipos litológicos é facilitada pelo maior gradiente piezométrico.

Tendo como base essas avaliações, propõe-se um modelo conceitual para os padrões de fluxos predominantes nas áreas de estudo, o qual é apresentado de forma esquemática na Figura 5.4.

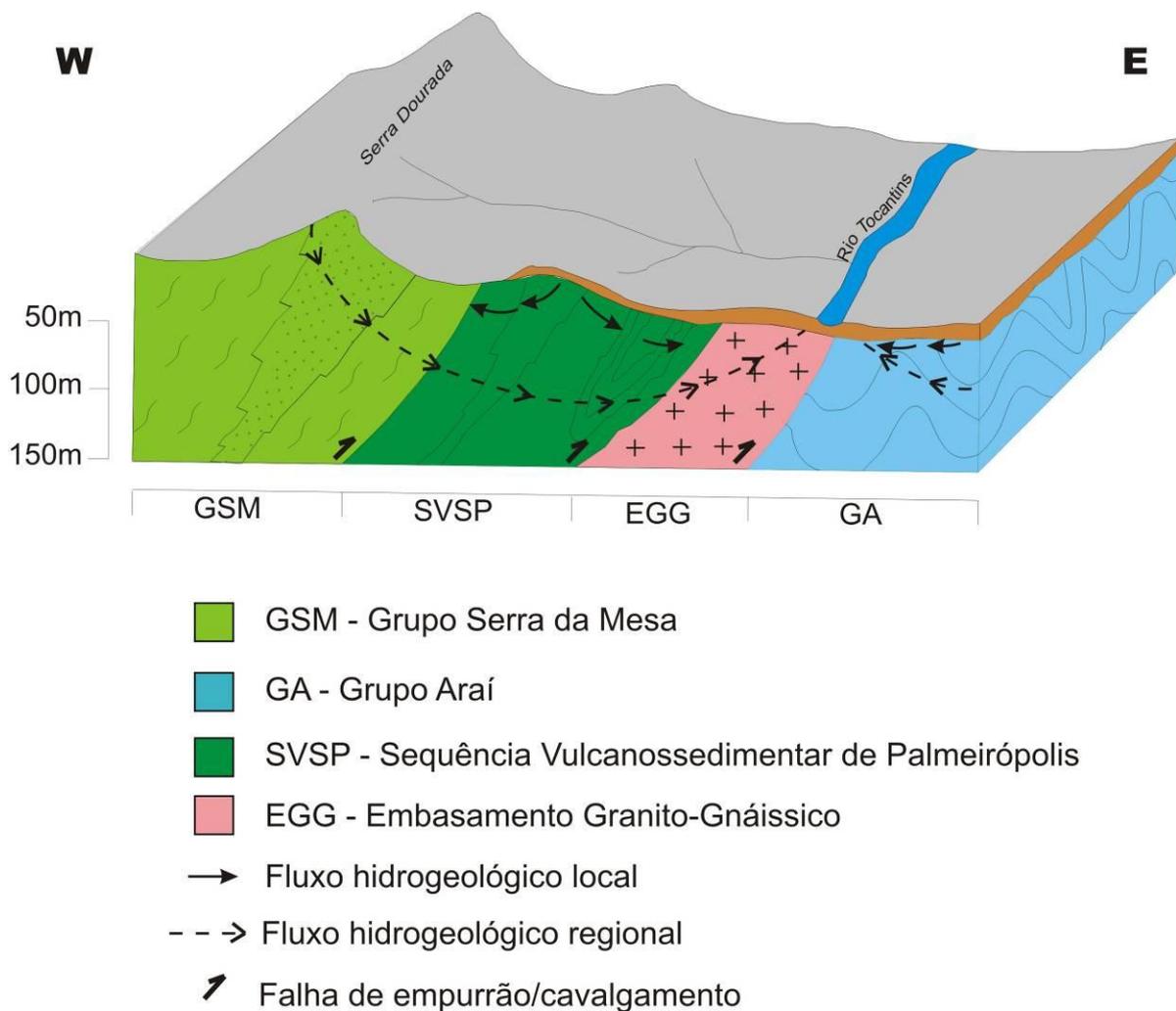


Figura 5.4 - Modelo hidrodinâmico do sistema aquífero freático-fraturado.

5.3 Recarga Natural

Admitindo-se a aplicabilidade do modelo hidrodinâmico apresentado anteriormente, as áreas de estudo são representadas por mecanismos de recarga regional e local.

Por meio da avaliação expedita dos atributos relacionados ao relevo, litologia e pedologia, é possível obter uma aproximação da distribuição das áreas de recarga natural (Figura 5.5).

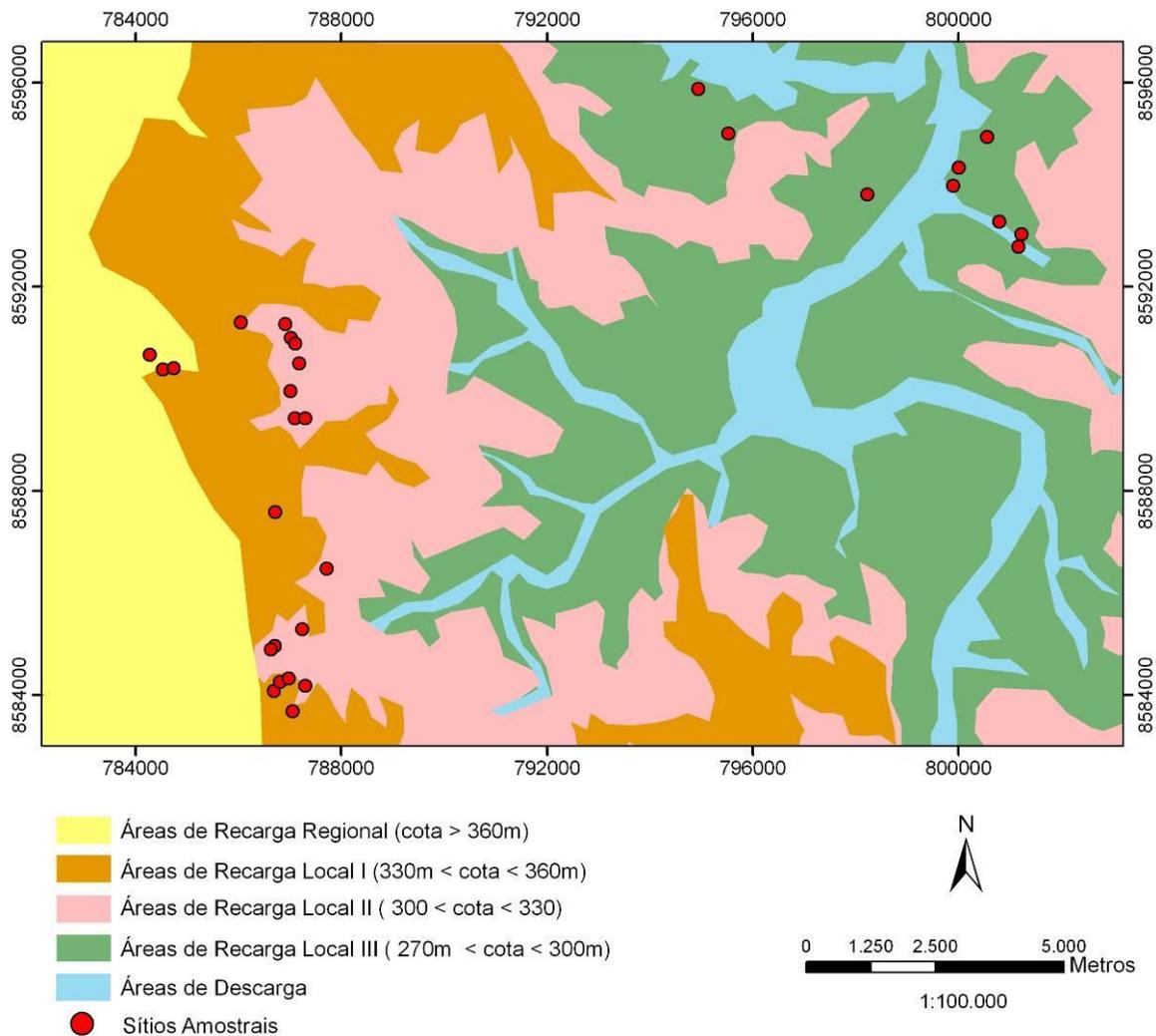


Figura 5.5 - Distribuição aproximada das áreas de recarga.

Invariavelmente, a recarga regional é responsável pelo abastecimento dos aquíferos do meio cristalino. Outra participação importante dos fluxos decorrentes das recargas regionais refere-se ao abastecimento dos cursos d'água perenes que, apesar de serem em pequeno número, constituem importantes tributários do rio Tocantins.

As formas de recarga local são responsáveis pelo abastecimento dos aquíferos rasos, bem como apresentam potencial de contribuição para os sistemas sotopostos, nos casos em que existam favorabilidade geológica (zonas de faturamento).

Os valores relativamente reduzidos da condutividade hidráulica vertical e os recortes no relevo favorecem a descarga dos sistemas freáticos para os pequenos cursos d'água intermitentes. As exceções de efetiva contribuição do sistema freático para os cursos d'água perenes referem-se aos casos onde há ocorrência de Neossolos Flúvicos.

Dados físico-químicos do córrego Jataí, localizado em área de Neossolos Flúvicos, revelaram maior proximidade entre os valores de condutividade elétrica das águas subterrâneas (aproximadamente $225\mu\text{S}/\text{cm}$) e superficiais ($145,6\ \mu\text{S}/\text{cm}$). Por outro lado, dados do córrego Piabanha, que drena áreas com outros tipos de solo (Cambissolos e Argissolos/Nitossolos), demonstraram forte discrepância entre os valores de condutividade hidráulica do sistema freático (superior a $250\ \mu\text{S}/\text{cm}$) e do curso hídrico superficial ($95,9\mu\text{S}/\text{cm}$). Esses dados, obtidos em condições de elevação nível freático (dezembro/2011), indicam a conexão hidráulica entre os solos e os cursos d'água perenes em ambientes de Neossolos Flúvicos.

Medições de níveis potenciométricos obtidas nos sítios amostrais durante o período chuvoso (Anexo II), mais precisamente entre outubro de 2011 e fevereiro de 2012, demonstraram o efeito da precipitação e a forma de recarga local, sobre a elevação do nível freático. Esse monitoramento de curto prazo também evidencia a influência dos sistemas de recarga artificial no controle da variação dos níveis. De maneira geral, os níveis freáticos começaram a se elevar de 40 a 60 dias após as primeiras precipitações intensas, bem como tiveram a ascensão continuada no decorrer do período chuvoso.

Correlacionando-se as médias das variações de nível freático (Δh), obtidas durante os monitoramentos do período chuvoso 2011/2012, e os dados de precipitação correspondentes aos intervalos desses monitoramentos, obtém-se 0,82 de coeficiente de correlação.

A análise das variações de carga hidráulica em função das classes de solo contribuiu para a avaliação da importância da pedologia nos processos de recarga das áreas de estudo. Referida análise foi feita em 29 dos 30 sítios amostrais, sendo excluído apenas o sítio BP-14, que se caracteriza como a única unidade pedológica de Neossolo Quartzarênico.

A Tabela 5.4 apresenta as variações nas cargas hidráulicas (Δh) dos sítios de pesquisa em função da classe de solo, no período que se estendeu de outubro de 2011 a fevereiro de 2012.

Tabela 5.4 - Variação da carga hidráulica (Δh) por tipologia de solo.

Solo predominante (classe)	Numero de Sítios Amostrais	Δh min (m)	Δh máx (m)	Δh médio (m)
Argissolo/Nitossolo	6	1,33	4,08	2,27
Neossolos Flúvicos	5	0,99	4,96	2,20
Neossolo Litólico/Nitossolo	3	1,46	2,41	1,92
Chernossolo	2	1,44	1,82	1,63
Solos Latossolizados	8	0,60	1,83	1,38
Cambissolo	5	0,54	2,31	1,38

As associações de Argissolos/Nitossolos observadas nos lotes 01, 05, 13 e 19 do reassentamento Piabanha II, e lotes 11 e 27 do reassentamento Piabalha I, exibiram as maiores variações de carga hidráulica. Mesmo havendo gradiente textural no horizonte subsuperficial, o que, em princípio, limita o mecanismo de infiltração, o razoável grau de estruturação desses solos tende a minimizar tal efeito. A estruturação do tipo granular média a grande é a mais comumente observada.

As variações nos Neossolos Flúvicos, com ocorrência nos sítios amostrais compreendidos pelos lotes 02, 11 do reassentamento Buriti-Piabanha, e lotes 01, 03 e 13 do reassentamento Jataí, também foram bastante expressivas. No entanto, há de se considerar que esses solos são passíveis de recarga indireta, tendo em vista a existência de conexão hidráulica com os cursos d'água superficiais, conforme discussão anterior.

Na sequência, apresentam-se as associações de Neossolos Litólicos/Nitossolos (lotes 10, 12 e 13 do reassentamento Piabanha I), os Chernossolos (lotes 02 e 03 do reassentamento Piabanha II), os solos latossolizados (lotes 02, 04 e 07 do reassentamento Jataí; lotes 10, 11 e 12 do reassentamento Piabanha II; e lotes 21 e 20 do reassentamento Piabanha I) e os Cambissolos (lotes 01, 02, 03, 05 e 06 do reassentamento Piabanha I).

Por meio desses resultados é possível verificar o efeito dos solos nos processos de recarga.

Uma vez que a condutividade hidráulica vertical é função da porosidade, da textura e da estrutura dos solos, tais parâmetros representam as variáveis mais importantes no controle do processo de infiltração. Quanto mais arenoso ou estruturado for o solo, a exemplo dos Latossolos, menor é a componente horizontal da condutividade hidráulica em relação à componente vertical, o que favorece o movimento da água no perfil.

De acordo com a Tabela 5.3, a componente vertical da condutividade hidráulica não é contrastante com a horizontal nesse tipo de solo, quando considerado os horizontes superficial e subsuperficial.

Solos argilosos, tais como as associações Argissolos/Nitossolos, têm a permeabilidade favorecida pelos processos de estruturação pedogenética. Dessa maneira a componente

vertical da condutividade hidráulica é superior à componente horizontal, favorecendo a verticalidade do mecanismo de infiltração.

Em solos pouco desenvolvidos, como é o caso dos Cambissolos, a componente horizontal da condutividade hidráulica (k_h) supera, significativamente, a componente vertical (k_v). Assim, a movimentação de água nesses solos tende à horizontalidade.

Uma particularidade dos Cambissolos das áreas de estudo diz respeito ao elevado teor de cascalho de quartzo na camada superficial que, por apresentar elevado contraste de condutividade hidráulica com a camada sotoposta, favorece o processo de escoamento total (*runoff*) logo após a saturação.

Os Neossolos Flúvicos, por sua vez, apresentam uma situação diferenciada. Nas primeiras camadas, constituídas pelo incremento de material fino, há redução progressiva nos valores de condutividade, conferindo-as uma condição de rápida saturação. Já em maiores profundidades, representadas pelo material parental (aluvião), a condutividade hidráulica torna-se significativamente maior. Essa condição favorece o equilíbrio no abastecimento do sistema, seja por meio da recarga local ou pela influência dos cursos hídricos superficiais, durante a ascensão da lâmina d'água típica do período de chuvoso.

Levando-se em conta as classes e as propriedades físicas dos solos predominantes na região de estudo, assim como as participações das componentes geomorfologia e geologia, admite-se que o modelo de recarga natural das áreas estudadas se aproxima da representação esquemática contida na Figura 5.6.

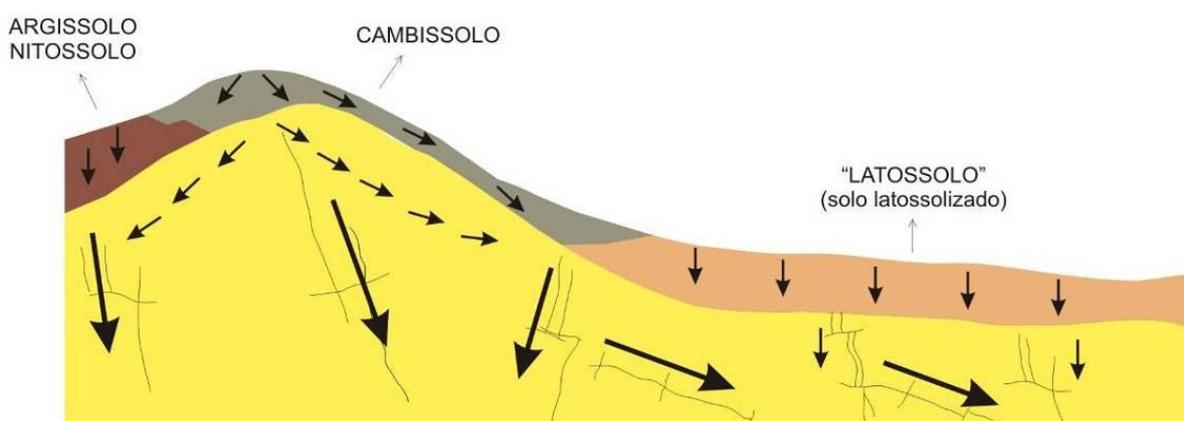


Figura 5.6 - Modelo conceitual de recarga. Setas pequenas representam a recarga local, setas grandes representam recarga a partir de fluxo regional, com fluxo a partir de áreas elevadas.

5.4 Avaliação da Eficiência dos Sistemas Pilotos de Recarga Artificial

As análises de eficiência das unidades de recarga artificial envolveram avaliações relacionadas à potenciometria e aos valores de condutividade elétrica, diretamente proporcional aos totais de sólidos dissolvidos nas águas.

Mesmo sem se dispor de série de dados que permita uma efetiva comparação entre as variações do nível freático antes e depois de instaladas as estruturas de recarga, alguns valores obtidos nas medições que se estenderam de outubro/2011 a fevereiro/2012 podem ser caracterizados como anomalias potenciométricas. Nessas condições acredita-se que o nível freático foi atingido pelo “raio de impacto” (Tu *et. al.*, 2010) dos processos de infiltração das caixas de recarga.

Foram consideradas variações anômalas aquelas em que o incremento no nível freático de cada poço, obtido entre outubro de 2011 e janeiro de 2012, supera 3,14m. Essa medida de referência foi obtida pela média das variações nos poços adicionada de uma vez o desvio padrão.

Com base nesse critério, os resultados consolidados na Tabela 5.5 mostram indícios de funcionalidade positiva das caixas de recarga para algumas classes de solo.

Tabela 5.5 - Valores anômalos de elevação do Nível Freático.

Sítio Amostral (identificação)	NF out/11 (m)	NF jan/12 (m)	Tipologia de solo (classe)
Lote PB-II 19	7,00	2,92	Argissolo/Nitossolo
Lote PB-II 13	5,78	1,60	Argissolo/Nitossolo
Lote PB-II 05	5,45	1,16	Argissolo/Nitossolo
Lote PB-II 01	10,13	6,28	Argissolo/Nitossolo
Lote BP 14	8,92	5,47	Neossolo Quartzarênico
Lote BP 11	5,62	2,21	Neossolo Flúvico
Lote BP 02	6,73	1,33	Neossolo Flúvico

As anomalias constatadas tendem a ser nada mais nada menos do que o efeito do cone de ascensão provocado pelo mecanismo de recarga artificial, conforme descrição de Singh (1976).

A Figura 5.7 representa um esquema de cone de ascensão aplicável às caixas de recarga que apresentaram eficiência potenciométrica.

A presença do cone de ascensão, bem como sua persistência no tempo pode ser corroborada com os dados da medição de nível realizada no início de mês de fevereiro de 2012, quando alguns poços apresentaram potenciometria inferior ao do mês de janeiro, sugerindo o início da dissipação da elevação artificial causada pela indução localizada da infiltração (Tabela 5.6).

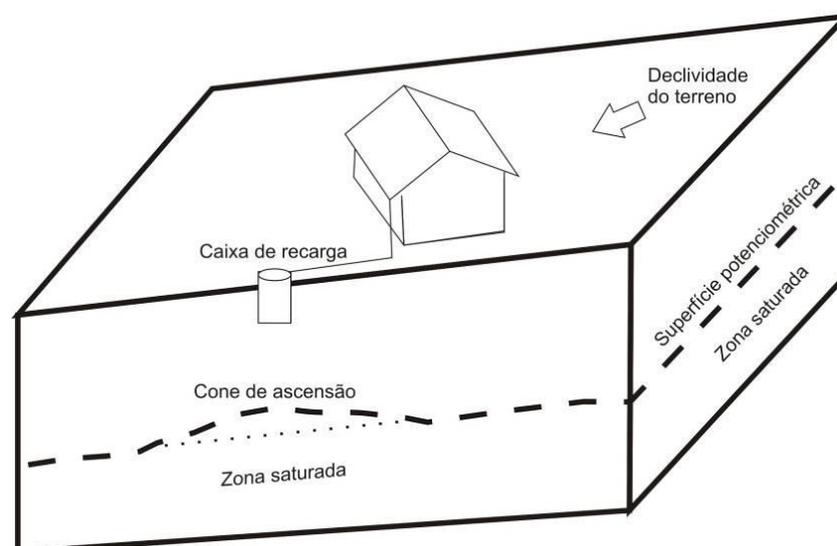


Figura 5.7 - representação esquemática da ascensão do nível freático, na forma de cone de ascensão (adaptado de Cadamuro & Campos, 2005).

Tabela 5.6 - Níveis freáticos decorrentes do cone de ascensão por infiltração e da dissipação desse fenômeno.

Sítio Amostral (identificação)	NF – Jan/12 (m)	NF – Fev/12 (m)	Tipologia de solo (classe)
Lote PB-II 19	3,61	2,92	Argissolo/Nitossolo
Lote PB-II 13	1,60	2,36	Argissolo/Nitossolo
Lote PB-II 05	1,16	2,05	Argissolo/Nitossolo
Lote PB-II 01	6,22	6,28	Argissolo/Nitossolo
Lote BP 14	7,13	5,47	Neossolo Quartzarênico
Lote BP 11	2,62	2,21	Neossolo Flúvico
Lote BP 02	1,33	1,77	Neossolo Flúvico

De acordo com a Tabela 5.6 constata-se que apenas quatro medidas de nível freático se caracterizam como dissipação do possível cone de ascensão. Dessa forma, confirma-se a existência de anomalias apenas para os poços dos lotes PB-II 13, PB-II 05, PB-II 01 e BP 02.

A representação genérica da dinâmica de infiltração a partir das caixas de recarga é apresentada no esquema da Figura 5.8. De acordo com esse esquema, a tendência à verticalidade da condutividade hidráulica resultante (K_r) será maior ou menor em função do tipo do solo.

Sob o ponto de vista da condutividade elétrica, parâmetro empregado para representar as condições de mineralização das águas em estudo, não ocorreram alterações significativas, mesmo nos poços onde foi visível a contribuição das caixas de recarga para o sistema. Esse fato pode ser notado ao se comparar os resultados obtidos em dezembro/2010, época em que os poços não dispunham de estruturas de recarga em funcionamento, com os meses de dezembro/2011, janeiro/2012 e fevereiro/2011, situação de plena atividade das caixas de recarga (Tabela 5.7).

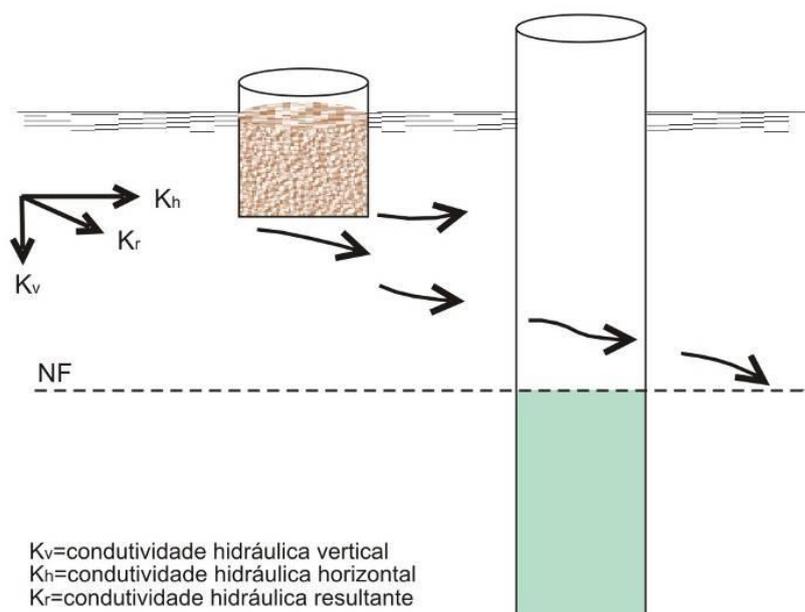


Figura 5.8 - Modelo de infiltração decorrente da recarga artificial.

Tabela 5.7 - Comparação dos valores de condutividade elétrica para os sítios que apresentaram anomalias potenciométricas.

Sítio Amostral (identificação)	CE dez/10 ($\mu\text{S/cm}$)	CE dez/11 ($\mu\text{S/cm}$)	CE jan/12 ($\mu\text{S/cm}$)	CE fev/12 ($\mu\text{S/cm}$)
Lote PB-II 13	504,0	565,0	321,0	431,0
Lote PB-II 05	267,0	167,3	140,0	182,2
Lote PB-II 01	254,5	261,0	241,0	273,0
Lote BP 02	87,0	68,9	100,3	190,6

Aparentes reduções na condutividade elétrica, destacadas em negrito, logo foram seguidas de aumentos, apontando para a tendência de estabilidade química das águas freáticas, conforme discussão no capítulo anterior.

Em relação à entrada de água no sistema, é oportuno informar que se constatou aumento dos índices de precipitação do período 2011/2012, em relação ao período 2010/2011, conforme dados de pluviômetro instalado no lote 04 do reassentamento Jataí (Anexos III e IV). Portanto, a disponibilidade de água não se apresenta como fator limitante à comparação expressa na Tabela 5.7.

A Tabela 5.8 consolida os acumulados de chuva nesses períodos, tendo-se o mês de janeiro como referência.

Tabela 5.8 - Precipitação acumulada nos períodos 2010/2011 e 2011/2012 até o mês de janeiro

Mês de referência	Total de precipitação (acumulado em mm)
Janeiro/2011	782
Janeiro/2012	929

CAPÍTULO VI

DISCUSSÕES FINAIS

Os tipos petrográficos das áreas de estudo, representados por filitos, quartzitos, metabasaltos, calcifilitos, xistos e mármore estratificados ou na forma de lentes; os padrões de relevo, que variam de forte ondulado a suave ondulado; e a diversidade dos solos, representada, principalmente, por Cambissolos, “Latosolos” (solos com processos pedogenéticos de latossolização), Neossolos Flúvicos e Argissolos/Nitossolos (solos podzolizados); definem um ambiente altamente favorável para a ocorrência de complexas interações entre o meio físico e as águas subterrâneas.

Essas condições retratam bem o entendimento clássico de Tiedeman *et al.* (1998) a respeito dos mecanismos de fluxo subterrâneo, que segundo os autores decorrem, fundamentalmente, das interações entre a geologia os solos e a geomorfologia.

Em função da conformação das bacias hidrogeológicas (Arraes & Campos, 2007), dispostas a oeste do Grupo Serra da Mesa e a leste no Grupo Araí, as áreas de estudo são submetidas a sistemas de fluxo subterrâneo local e regional.

Os fluxos decorrentes de recarga regionais são responsáveis pelo abastecimento do sistema cristalino e dos cursos d’água perenes.

Os fluxos provenientes das recargas locais são fortemente influenciados pelas propriedades físicas dos solos, particularmente pela condutividade hidráulica. Esses fluxos além de comporem o sistema freático da região, são responsáveis pelo abastecimento dos cursos d’água intermitentes. As exceções de conexões hidráulicas com os cursos d’água permanentes ocorrem, apenas, quando o sistema freático se desenvolve sob Neossolos Flúvicos.

Nos mecanismos de recarga natural e artificial, o papel dos solos é extremamente importante, tendo em vista que o funcionamento hídrico na zona vadosa é função direta das condições de permeabilidade, que são variáveis de solo para solo. Enquanto a maior eficiência de recarga é observada em solos bem estruturados, como os solos podzolizados (argissolos/nitossolos), e em solos desenvolvidos sobre aluvião (neossolos flúvicos), os piores resultados são observados em cambissolos.

Todavia, nos casos em que os cambissolos aparecem associados com solos podzolizados os mecanismos de recarga são sensivelmente melhorados.

Contrariamente ao previsto, os “Latosolos” não obtiveram destaque nos processos de recarga, natural e artificial, considerado o método de avaliação potenciométrica. Os valores pouco expressivos nas variações de carga hidráulica desses solos, tipicamente representados pelas maiores condutividades hidráulicas, são justificados pela maior profundidade da zona vadosa, o que, de certa maneira, limita as variações de carga hidráulica no tempo de observação considerado. A geometria dos aquíferos sob essa classe de solo também contribui para esse fenômeno.

Cabe destacar que Souza & Campos (2001), em estudos sobre o papel dos regolitos nos processos de recarga de aquíferos do Distrito Federal, identificaram a grande importância dos Latossolos quando consideradas as condições de recarga.

Fiori *et al.* (2010) obtiveram conclusões semelhantes com relação ao funcionamento hídrico dos solos em trabalho realizado no estado de Goiás. Os Latossolos apresentam as melhores condições de infiltração (independe mente do material parental), seguido de solos podzolizados (Nitossolos e argissolos). Os Cambissolos mostraram as condições mais adversas para a infiltração.

Sob o ponto de vista prático, nos solos mais desenvolvidos a componente vertical do processo de infiltração tende a superar a componente horizontal, isto é, a resultante dessas duas componentes tem maior tendência à verticalidade. O contrário ocorre nos solos pouco desenvolvidos, onde a componente horizontal da condutividade hidráulica tende a ser maior do que a vertical, implicando em maior espalhamento da água no perfil do solo e na tendência de ampliação do interfluxo. Esses mesmos princípios se refletiram nos pilotos de recarga instalados nas áreas de estudo, quando das avaliações de variações de carga hidráulica dessas estruturas.

O principal diferencial entre os mecanismos de recarga natural e artificial, na forma de caixas de infiltração, refere-se às perdas com evapotranspiração e escoamentos externos e internos. Além dos sistemas artificial minimizarem sensivelmente essas perdas, também propiciam maior carga hidráulica por unidade de área (carga hidráulica localizada), o que tende a influenciar na velocidade de infiltração em maiores profundidades.

Os aspectos geológicos, que em conjunto com a pedologia e geomorfologia representam as principais variáveis de definição dos sistemas de fluxos, também são diretamente responsáveis pelas características químicas das águas da região.

As ocorrências de metacalcário/metadolomito na forma de lentes e de xistos carbonáticos estabelecem condições geoquímicas locais capazes de disponibilizar íons como o cálcio, o magnésio e o bicarbonato para os sistemas aquíferos estudados, o que resulta em

águas bicarbonatadas cálcicas/magnesianas, ressaltando que o cálcio e o bicarbonato representam mais de 80% dos íons que compõem o total de sólidos dissolvidos (TDS).

A favorabilidade para mineralização das águas da região é maior nos aquíferos freáticos desenvolvidas em saprolitos originários de metacalcários/metadolomitos e de xistos carbonáticos, os quais tendem a apresentar elevada reatividade. Nessas condições, a mineralização das águas subterrâneas se inicia nos mecanismos de infiltração e se estende durante os fluxos subterrâneos, em geral, bastante lentos em função dos valores de condutividade hidráulica, normalmente inferiores a 10^{-7} m/s.

Estudos realizados em Utah (USA) por Mayo & Morris (2000), demonstram o efeito das limitações de migração vertical da água subterrânea no aumento da mineralização local.

Também poderia ser aventada a hipótese da evapotranspiração potencial da região (1250 mm THEMAG,2000) contribuir para os processos de mineralização. Contudo, a constituição da matriz geoquímica predominantemente por carbonatos é desfavorável a tal processo. Por exemplo, esse tipo de hipótese se aplica bem em condições, de existência de cloretos, como ocorre em muitas áreas do nordeste brasileiro.

Tendo em vista as condições naturais de equilíbrio químico entre as espécies de cálcio e carbono, que envolvem processos de dissolução e precipitação do carbonato de cálcio (CaCO_3), os sistemas estudados apresentaram significativa capacidade de tamponamento. Essa capacidade é refletida na tendência das águas não apresentarem alterações significativas no parâmetro condutividade elétrica, independente das épocas do ano, onde se tem maior ou menor volume de entrada de água de chuva nos sistemas.

Assim, embora não se trate de região cárstica, a diversidade petrográfica faz com que determinadas áreas tenham favorabilidade geoquímica para que as reações entre as espécies de carbono e cálcio confirmem condições de estabilidade química para as águas em estudo, durante todos os períodos do ano.

Estudos recentemente realizados por Abid *et al.* (2011) no aquífero Turonian (Sul da Tunísia) corroboram esses entendimentos. Os autores além de identificarem os efeitos das condições estratigráficas, tectônicas e hidráulicas do sistema sobre a evolução geoquímica das águas subterrâneas, também enfatizaram participação dos processos de dissolução/precipitação do carbonato de cálcio (CaCO_3) e da gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

Dessa maneira, a manutenção do equilíbrio químico do sistema em estudo decorre do comportamento do carbonato de cálcio, cujas condições para solubilização ou precipitação são reguladas pela concentração desse mineral e pelo pH da solução (Stumm & Morgan, 1995). Por meio do processamento dos dados hidroquímicos foi identificado que o pH igual a 6,7

representa o ponto de equilíbrio abaixo do qual o carbonato passa a solubilizar e acima do qual o carbonato tende a precipitar.

As possibilidades de trocas iônicas entre o sódio e o cálcio, assim como de precipitação de sulfato de cálcio, não apresentam interferências significativas no referido equilíbrio químico, uma vez que as concentrações de cálcio e de bicarbonato são muito mais elevadas.

Especificamente sobre a funcionalidade dos sistemas pilotos de recarga, a constatação de anomalias na elevação de níveis freáticos indicou visível eficiência em quatro das vinte e nove unidades piloto.

Referidas anomalias, constatadas em áreas de Argissolos/Nitossolos e de Neossolos Flúvicos podem ser interpretadas como função das condições de condutividade hidráulica dos solos onde se situam as caixas de recarga, bem como do posicionamento dessas estruturas em relação aos poços e ao nível freático.

Em geral, quando o nível freático situava-se a mais de 3 metros da cota de fundo das caixas de recarga, os efeitos na elevação não foram significativos.

Nos Cambissolos, onde a componente horizontal da condutividade hidráulica supera a vertical, pode-se assegurar que as estruturas de recarga não apresentaram efeito significativo no nível d'água do poço de captação.

Estas avaliações sugerem que os projetos de recarga artificial destinados a beneficiar poços de captação localizados em solos de baixa permeabilidade, devem levar em conta:

- A correta localização espacial das caixas de recarga em relação ao gradiente hidráulico fornecido pelo terreno;
- A distância entre a cota de fundo da caixa de recarga e o nível freático;
- O volume de água a ser disponibilizado, calculado em função dos índices pluviométricos, das áreas disponíveis para captação e das perdas do sistema de condução; e
- As relações entre as componentes vertical e horizontal da condutividade hidráulica, o que exige o desenvolvimento de ensaios de infiltração *in situ*, a diferentes profundidades nos locais em que se pretende instalar sistemas de recarga artificial similares.

Bouwer (2002) corrobora com esses entendimentos, quando considera que o planejamento e a gestão dos sistemas de recarga envolvem aspectos relacionados à engenharia, geologia, hidrologia, geoquímica e biologia.

Todavia, em razão das condições de tamponamento químico naturalmente presentes nos aquíferos das áreas de estudo, é praticamente improvável que esses tipos de estruturas

venham a promover a almejada minimização dos efeitos da mineralização. Diminuições no quantitativo de íons do sistema, eventualmente percebidas, logo serão compensadas pelos processos de tamponamento.

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES

Os ambientes freáticos das áreas estudadas são, em geral, mantidos, por sistemas de fluxo local, cujos processos de recarga são mais acentuados em solos podzolizados (Argissolos/Nitossolos), seguidos dos solos em que tenham ocorrido processos pedogenéticos de latossolização. Nas áreas constituídas por Neossolos Flúvicos (desenvolvidos sobre material aluvionar) os processos de recarga também são extremamente significativos, porém, com evidente contribuição de recarga indireta, ou seja, a partir dos cursos d'água superficiais.

Dentre os diversos tipos petrográficos existentes, os metabasaltos/metacalcários e os xistos carbonáticos são os principais responsáveis pela caracterização hidroquímica das águas da região, classificadas como bicarbonatadas cálcicas e magnesianas.

A presença de carbonato de cálcio no sistema faz com que as águas subterrâneas tenham elevada capacidade tamponante, definida pelos processos de solubilidade ou precipitação dessa espécie química. Com o aporte de águas de chuva há redução de pH até o valor de equilíbrio (6,7), e se inicia o processo de solubilização do carbonato de cálcio, com consequente disponibilização de íons no sistema. Cessadas as chuvas, o pH se eleva e o carbonato de cálcio retorna à forma precipitada. Dessa maneira se estabelece o equilíbrio das concentrações iônicas do sistema, independente do volume de água do aquífero.

Esse mesmo tipo de resposta foi obtido para os mecanismos de indução de infiltração, promovidos pelos sistemas piloto de recarga artificial.

As complexas interações entre os mecanismos de fluxo e mineralização constatadas nas áreas de estudo, remetem ao fato de que eventuais tentativas de interferências naqueles sistemas, voltadas ao uso e a gestão das águas subterrâneas do domínio poroso ou cristalino, devem ser devidamente embasadas no conhecimento das particularidades pedo-geológicas e geoquímicas da região.

Por fim, considerando que os pilotos de recarga constituem estruturas que apresentam plenas condições para continuar gerando informações sobre a hidráulica da zona vadosa e sobre comportamento hidroquímico do meio saturado, recomenda-se dar prosseguimento ao monitoramento do nível freático, pH e condutividade elétrica (ou TDS), por pelo menos mais um ciclo hidrológico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABGE. 1996. Ensaio de permeabilidade em solos - orientações para sua execução no campo. Boletim n°. 4. São Paulo.
- Abid, K. Zouari, K. Dulinsk, M. Chkir, M. Abidi, B. 2011. Hydrologic and geologic factors controlling groundwater geochemistry in the Turonian aquifer (southern Tunisia). *Hydrogeology Journal*. 19(2):415-427.
- Andriotti, J.L.S. 2005. Fundamentos de estatística e geoestatística. Unisinos, São Leopoldo, 165pp.
- Alvarenga C.J.S.; Botelho, N.F.; Dardenne, M.A.; Almeida, T. 2006. Programa Geologia do Brasil (PGB/LGB) - Cartas Geológicas. Relatório Final da Folha SD.23-V-C-VI Nova Roma, Estado de Goiás. Escala 1:100.000. Brasília: UnB/CPRM, 2006.
- APHA, AWWA, WPCF. 1998. Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water. 20th. Ed. Baltimore, Maryland.
- Arraes, T.M. & Campos, J.E.G. 2007. Proposição de critérios para avaliação e delimitação de bacias hidrogeológicas. *Revista Brasileira de Geociências* 37(1):81-89.
- Bisquerra, R.; Sarriera J.C.; Martínez, F. 2004. Introdução a estatística: enfoque informático com o pacote estatístico SPSS. Trad. Fátima Murad. Artmed, Porto Alegre, 254pp.
- Boaventura, G.R. & Freitas, A.L.S. 2006. Inorganic parameters as water quality indicators in acidic groundwater in a tropical region - Brasilia-DF (Brazil). *Water, Air, & Soil Pollution*. 171(1):135-151.
- Botelho, N.F.; Fuck R.A.; Elton L.D.; Laux J.L.; Junges S.L. 2006. The Paleoproterozoic peraluminous Aurumina granite Suite, Goiás and Tocantins Whole rock geochemistry and U-Pb and Sm-Nd isotopic constrain. The Paleoproterozoic Record of the São Francisco Craton. Brazil. IGCP 509, Brazil september 9-21. 2006
- Bouwer, H. 2002. "Artificial recharge of groundwater: Hydrogeology and engineering". *Hydrogeology Journal*. N.10, pp. 121-142.
- Brookins, D.G. 1988. Eh-pH Diagrams for geochemistry. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. New York, 176pp.
- Cadamuro, A.L.M. & Campos, J.E.G. 2005. Recarga artificial de aquíferos fraturados no Distrito Federal: uma ferramenta para a gestão dos recursos hídricos. *Revista Brasileira de Geociências*.
- Campos, J.E.G., Fiori, J.P.O. Relatório Técnico. 2009. Gestão do Sistema de Abastecimento de Água dos Reassentamentos Piabanha I e II, Jataí, Santa Cruz e Remanescentes, Estado do Tocantins. CTD/ UnB - ENERPEIXE. 74pp.
- Campos, J.E.G., Seidel, A.M.; Santos, L.M. 2005. Relatório Parcial 1. Plano Ambiental 5 e 6 Monitoramento de encostas marginais e monitoramento hidrogeológico. CTD/ UnB - ENERPEIXE. 51 pp.
- Chang, H.K., Teixeira, A.J., Vidal, A.C. 2003. Aspectos Hidrogeológicos e Hidroquímicos das regiões dos municípios de Mogi Mirim, Mogi Guaçu e Itapira no estado de São Paulo. *Geociências*. 22(esp):63-73.
- CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. 1986. Resolução 01. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res86/res0186.html>. Acessado em 01/2012.

- CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. 2008. Resolução 396. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=562>. Acessado em 02/2012.
- Dardenne, M.A. 2000. The Brasília Fold Belt. In: Cordani, U.G. Milani, E.J. Thomaz Filho, A.Campos, D.A. (eds). Tectonic Evolution of South America. 31st Int. Geol. Congr., Rio de Janeiro, pp. 231-263.
- Dever, J.I. 1988. The geochemistry of natural water. 2nd ed. Prentice Hall, New Jersey, 437pp.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2006. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 2ª. ed. Rio de Janeiro, 306pp.
- Feitosa, F.A.C., Feitosa, E.C., Demétrio, J.G.A. 2008. Hidrogeologia: conceitos e aplicações. 3ª. Ed. CPRM, Rio de Janeiro, 812pp.
- Feitosa, F.A.C.; Manoel Filho, J. 2000. Hidrogeologia: conceitos e aplicações. 2ª. Ed. CPRM, Fortaleza, 391 pp.
- Fetter, C.W. 2001. Applied hydrogeology. 4th edition. Prentice Hall, USA, 598pp.
- Fiori, J.P.O. 2010. Avaliação de métodos de campo para a determinação de condutividade hidráulica em meios saturados e não saturados. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. 107p.
- Fiori, J.P.O.; Campos, J.E.G.; Almeida, L. 2010. Variabilidade da condutividade hidráulica das principais classes de solos do estado de Goiás. Geociências 29(2):229-235.
- Fitzsimons, V.P.; Missteat, B.D.R. 2006. Estimating groundwater recharge through tills: a sensitivity analysis of soil moisture budgets and till properties in Ireland. Hydrogeology Journal. 14: 548–561.
- Gastmans, D., Alberto, M.C., Bufon, A.G.M., Moraes, F.T., Santos, M.M., Silva, J.R.M., Chang, H.K. 2005. Implicações hidroquímicas da interação rocha-água: interpretações através da representação gráfica de análises químicas de águas subterrâneas. In: XIV Encontro Nacional de Perfuradores de Poços. II Simpósio de Hidrogeologia do Sudeste. Associação Brasileira de Águas Subterrâneas. São Paulo.
- Gastmans, D., Chang, H.K., Hutcheon, I. 2010. Groundwater geochemical evolution in the northern portion of the Guarani Aquifer System (Brazil) and its relationship to diagenetic features. Applied Geochemistry. 25(1):16-33.
- HIDRONORTE - Poços Artesianos e Construções Ltda. 2011. Laudo de Poço Tubular Profundo, Piabonha II - Lote 7. 5pp.
- HIDRONORTE - Poços Artesianos e Construções Ltda. 2011. Laudo de Poço Tubular Profundo, Área Remanescente - Lote 18. 5pp.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2004. Indicadores de desenvolvimento sustentável. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/download/estatistica.shtm>. Acessado em 10/2011.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2007. Manual Técnico de Pedologia. 2ª. Edição, Rio de Janeiro, 315pp. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/recursosnaturais/>. Acessado em 01/2012.
- INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. 2011. Balanço Hídrico Climático. Disponível em: [http://www.inmet.gov.br/html/agro.php?lnk=Hídrico Climático](http://www.inmet.gov.br/html/agro.php?lnk=Hídrico%20Climático) Acessado em 12/2012.

- Jie, Z.; Bendel, D.; Barthel, R.; Heyden, J. 2011. Combination of soil-water balance models and water-table fluctuation methods for evaluation and improvement of groundwater recharge Calculations. *Hydrogeology Journal*.19:1487–1502.
- Käss Werner. 1998. *Tracing Techique in Geohydrology*. A.A. Balkema/Rotterdam/Brookfield, USA. 581pp.
- Langmuir, D. 1997. *Aqueous environmental geochemistry*. Prantice-Hall, Inc. New Jersey, 600p.
- Logan, J. 1965. *Interpretação de análises químicas de água*. U.S. Agency for International Development, Recife, 67pp.
- Lousada, E.O; Campos, J.E.G. 2005. Proposta de modelos hidrogeológicos conceituais aplicados aos aquíferos da região do Distrito Federal. *Revista Brasileira de Geociências*. 35(3): 407-414.
- Manahan, S.E. 1991. *Environmental chemistry*, 5th edition. Lewis Publishers, USA, 583 pp.
- Mayo, A.L.; Morris, T.H. 2000. Conceptual model of groundwater flow in stratified mountainous terrain, Utah, USA. In: *Proceedings of the XXX IAH Congress on Groundwater: past Achievements and future challenges*, Africa do Sul. Edited by Oliver Sililo. 225-229.
- Ministério da Saúde. 2011. Portaria 2914. Disponível em: http://bvsmms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html. Acessado em 02/2012.
- Pinheiro, I.D.P.; Cunha, S.B; Carvajal, S.R.; Gomes, G.C. 2009. *Estatística básica: a arte de trabalhar com dados*. Elsevier, Rio de Janeiro, 288pp.
- Pinto, E.J.A.; Lima, J.E.S.; Davis, E.G.; Silva, A.J.; Dantas, C.E.O.; Candido, M.O.; Palmier, L. R.; Monte-Mor, R.C.A. 2010. Estimativa da Recarga do Aquífero Livre de uma Sub-Bacia Representativa de Juatuba (MG) Aplicando Método da Variação dos Níveis d'Água (VNA). In: *XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, São Luís - MA. Anais do XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2010*.
- Press, F.; Siever, R.; Grotzinger.; Jordam T.H. 2008. *Para Entender a Terra*. 4^a. Edição. Bookman, Porto Alegre, 656pp.
- Reddy, A.G.S.; Niranjan Kumar, K. 2009. Identification of the hydrogeochemical processes in groundwater using major ion chemistry: a case study of Penna-Chitravathi river basins in Southern India. *Earth and Environmental Science*. 170:365-382.
- Reichardt, K.1990. *A água em sistemas agrícolas*. Editora Manole Ltda, São Paulo, 188pp.
- Saksono, N.; Yuliusman; Bismo, S.; Soemantojo, R.W.; Manaf, A. 2009. Effects of pH on calcium carbonate precipitation under magnetic field. *Makara, Teknologi*. 13(2):79-85.
- Sánchez, L.E.2008. *Avaliação de impacto ambiental: conceitos e métodos*. Oficina de Textos, São Paulo, 495pp.
- Shobbenhaus, C.; Campos, D.A.; Derze, GR., ASMUS, H.E. 1984. *Geologia do Brasil*. Texto explicativo do mapa geológico do Brasil e da área oceânica adjacente incluindo depósitos minerais. Departamento Nacional da Produção Mineral, Brasília, 307-314.
- Silva, M.F.B.; Nicoletti, A.; Rocca, A.C.C.; Casarini, D.C.P. 1998. Uso e qualidade das águas subterrâneas para abastecimento público no Estado de São Paulo. In: *Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 10. Associação Brasileira de Águas Subterrâneas*. São Paulo. CD-ROM.

- Singh R. 1976. Prediction of mound geometry under recharge basins. *Water Resources Research*, 12:775-780.
- Souza, R.S. 2008. Avaliação Química de Águas Subterrâneas Freáticas em Áreas de Interferência da Usina Hidrelétrica de Peixe Angical/TO. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília.
- Souza, T.M.; Campos, J.E.G. 2001. O papel dos regolitos nos processos de recarga de aquíferos do Distrito Federal. *Revista Escola de Minas, Ouro Preto* 54(3):191-198.
- Stumm, W. & Morgan, J.J. 1995. *Aquatic chemistry: chemical equilibria and rates in natural waters*. 3rd. ed. Environmental Science and Technology. USA, 1022 pp.
- Suhogusoff, A.V.; Ferrari, L.C.K.M.; Hirata, R.C.A.; Mondin, M.; 2002. Mecanismo de controle da recarga em aquíferos sedimentares livres. Estudo de Ocorrência na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê, São Paulo (Brasil). *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. 11(3):5-15.
- THEMAG - Engenharia e Gerenciamento Ltda. 2000. Estudo de Impacto Ambiental do Aproveitamento Hidrelétrico de Peixe Angical. Volume 2 - Tomo A, 52pp.
- Tiedeman, R.C.; Goode, D.J.E.; Hsieh, P.A. 1998. Characterizing a ground water basin in New England Mountain and valley terrain. *Ground Water* 36(4):611-621.
- Tu, Y.C; Ting, C.S.; Tsai, H.T.; Chen, J.W.; Lee, C.H. 2010. Dynamic analysis of the infiltration rate of artificial recharge of groundwater: a case study of Wanglong Lake, Pingtung, Taiwan. *Environ Earth Sci*. 63:77-85.
- Vasconcelos, J.M. 2009. Relatório construtivo de poço tubular profundo: Lote 07-Pibanha II. Fuad Rassi - ENERPEIXE. Goiânia, 5pp.
- Velasquez, L.N.M.; Oliveira, F.R.; Mourão, M.A.A.; Duarte, U.; Castro, R.E.L.; Diniz, A.M.A.; Elmiro, M. A. T.; Pereira, P. B.; Diniz, H. N. 2003. Hidroquímica das águas subterrâneas do Médio Vale Jequitinhonha, Minas Gerais, Brasil. *Revista Latino Americana de Hidrogeologia*. 3:49-58.
- Vries, J.J., Simmers, I. 2002. Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. USA, *Hydrogeology Journal*. 10:5-17.
- Yeh, H.F.; Lee, V.H.; Chen, J.F.; Chen, W.P. 2005. Estimation of groundwater recharge using water balance model. *Water Resources*. 34(2):153-162.