



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEODINÂMICA E
GEOFÍSICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

***AVALIAÇÃO DO AQUÍFERO CÁRSTICO JANDAÍRA NA
REGIÃO DE BARAÚNA, RIO GRANDE DO NORTE***

Autor: RENAN DA COSTA OLIVEIRA

Orientador: PROF. DR. JOSÉ GERALDO DE MELO

Dissertação nº 181/PPGG

Natal – RN, agosto de 2016.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEODINÂMICA E
GEOFÍSICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

***AVALIAÇÃO DO AQUÍFERO CÁRSTICO JANDAÍRA NA
REGIÃO DE BARAÚNA, RIO GRANDE DO NORTE***

RENAN DA COSTA OLIVEIRA

Dissertação de mestrado apresentada como requisito para obtenção do Título de Mestre em Geociências, área de recursos hídricos, recursos minerais e meio ambiente pelo Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Dr. José Geraldo de Melo

(Orientador – Departamento de Geologia UFRN)

Dr. José Braz Diniz Filho

(Membro Interno – Departamento de Geologia da UFRN)

Dr. Mickaelon Belchior Vasconcelos

(Membro Externo – CPRM – Serviço Geológico do Brasil)

Natal – RN, agosto de 2016

Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN

Sistema de Bibliotecas – SISBI

Catálogo da Publicação na Fonte - Biblioteca Central Zila Mamede

Oliveira, Renan da Costa.

Avaliação do aquífero cárstico Jandaíra na região de Baraúna, Rio Grande do Norte / Renan da Costa Oliveira. – 2017.
128f.: il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica. Natal, RN, 2017.

Orientador: Prof. Dr. José Geraldo de Melo.

1. Aquífero Jandaíra – Dissertação. 2. Carstificação – Dissertação.
3. Parâmetros hidrodinâmicos – Dissertação. 4. Anisotropia –
Dissertação. I. Melo, José Geraldo de. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU: 556.33(813.2)

Ao meu avô, Valdemiro Pascoal da Costa

(In memoriam)

Ofereço.

*Àqueles que me ajudaram a
chegar até aqui, meus pais e a
minha amada esposa Júlia*

Dedico

Agradecimentos

A Deus pela vida e por tudo o que tem me concedido.

Aos meus pais Gilvan de Souza Oliveira e Maria Aparecida da Costa Oliveira, a minha irmã Jessica, minha amada esposa Julia Taynar, assim como toda a família, pelo incentivo e companheirismo

Aos meus grandes amigos Alexandre Leite, Allyson Benedito, Everlânio Ferreira, Cassio Pascoal, Murilo Marvel, Douglas Diogenes, Paulo André, Hennedy Benevides, Júnior Lira, Alvaro Igor, Raí Oliveira, Diogo Leite, Francisco Moraes, Savio Raggy, João Cassio, Cleiton Kaio e Mikael Jackson pela amizade, companheirismo e incentivo para chegar até aqui.

Aos colegas e amigos de mestrado Rafaela Alves, Aryane Leonidio, Alanny Melo, Diogo Santos, Lucas Miguel e Isaac Vinicius pela amizade e contribuição ao trabalho.

Aos colegas e amigos de laboratório (GPAS): Jadson Gomes, Christiane Câmara e Rafael Danuzio pela amizade e prestatividade.

Ao Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, nas pessoas dos coordenadores Zorano Sergio de Souza e Moab Praxedes Gomes.

Ao Professor Dr. José Geraldo de Melo, pela confiança, orientação e amizade ao longo desses dois anos.

Ao Professor Dr. José Braz Diniz Filho, pela contribuição em ideias e conteúdo que enriqueceram o trabalho.

Ao Dr. Mickaelon Belchior Vasconcelos, pela disponibilidade e contribuição ao trabalho.

Ao Professor e grande amigo Vanildo Pereira da Fonseca pela amizade e disposição em ajudar.

Ao Professor Dr. Narendra Kumar Srivastava pela contribuição em ideias e conteúdo.

À Mizu Cimentos e ao Prof. José Geilson Alves Demétrio pelo apoio e contribuição no conteúdo.

A secretária do PPGG, Nilda Lima, pela amizade, paciência e atenção dada quando necessária.

RESUMO

A área de estudo localiza-se na região do município de Baraúna-RN, extremo oeste do Estado do Rio Grande do Norte. Abrange uma superfície de 675 Km², incluindo o Município de Baraúna, e parte dos municípios de Quixeré-CE e Mossoró-RN. O aquífero Jandaíra constitui a unidade hidrogeológica objeto deste trabalho. Trata-se de um aquífero de rochas carbonáticas utilizado no suprimento hídrico da população urbana (Baraúna) e rural, principalmente da fruticultura irrigada. O objetivo do trabalho é avaliar o comportamento hidrogeológico do aquífero cárstico Jandaíra, verificar suas condições de utilização, avaliar o caráter de fluxo subterrâneo, propor o modelo conceitual, além de responder a questionamentos sobre o rebaixamento dos níveis de água. Para isso, foi realizado o levantamento dos dados existentes para a área, a elaboração de mapas e interpretação de imagens, a elaboração de perfis de poços, o levantamento de parâmetros hidrodinâmicos, a avaliação do fluxo subterrâneo, a avaliação de recarga e geração do modelo conceitual esquemático. Com base em dados existentes, a área foi subdividida em três zoneamentos quanto a carstificação e identificados por métodos geofísicos e esquematizado no modelo conceitual com o auxílio de mapas de estruturas, perfis de poços e identificação de carstes na região. A área possui forte exploração das águas do aquífero Jandaíra com utilização principalmente na fruticultura irrigada como mostrou o estudo de utilização das águas na região. Também foram elaboradas as estimativas de reservas com base na variação de nível da água em poços selecionados. Os estudos referentes ao fluxo subterrâneo mostraram uma tendência natural de fluxo na direção SW-NE, porém a forte influência da exploração das águas provocou uma convergência para o setor central da área. A construção do modelo conceitual esquemático visou identificar as diferentes estruturas apresentadas pelo aquífero na região, mostrando a variação no desenvolvimento cárstico. O cálculo de recarga mostrou o alto potencial do aquífero Jandaíra, com rendimento médio de 45%, a análise dos registros de chuvas e níveis estáticos mostrou que a causa para o rebaixamento das águas subterrâneas possui dois fatores importantes: a forte exploração das águas aliada as secas prolongadas.

Palavras-chave: aquífero Jandaíra; carstificação; parâmetros hidrodinâmicos; anisotropia.

ABSTRACT

The study area is located in the region of Baraúna-RN city, extreme West of the State of Rio Grande do Norte. It covers an area of 675 square kilometers, including the Municipality of Baraúna, and part of the municipalities of Quixeré-CE and Mossoro-RN. The Jandaíra aquifer constitutes the hydrogeological unit and it is the object of this work. It is an aquifer of carbonate rocks used in the water supply of urban and rural population, mainly of the irrigated fruit-growing. The objective of this work is to evaluate the hydrogeological behavior of the Jandaíra karst aquifer, to verify its conditions of use, to evaluate the underground flow character, to propose the conceptual model, and to answer questions about the lowering of water levels. For this, was performed the survey of the existing data for the area, the elaboration of maps and interpretation of images, the elaboration of well profiles, the hydrodynamic parameters survey, the underground flow evaluation, the recharge evaluation and generation of the model conceptual schematic. Based on existing data, the area was subdivided into three zoning for karstification and identified by geophysical methods and schematized in the conceptual model with the aid of structure maps, well profiles and identification of karst in the region. The area has strong exploitation of the water of the Jandaíra aquifer with use mainly in irrigated fruit-growing as shown by the study of water use in the region. Also were prepared the reserves estimates based on the water level variation in selected wells. The related studies to underground flow showed a natural flow tendency in the SW-NE direction, but the strong influence of the water exploitation caused a convergence for the central sector of the area. The construction of the conceptual schematic model aimed to identify the different structures presented by the aquifer in the region, showing the variation in karstic development. The recharge calculation showed the high potential of the Jandaíra aquifer, with an average yield of 45%, the analysis of rainfall records and static levels showed that the cause for groundwater retraction has two important factors: The strong exploitation of the waters combined with the prolonged droughts.

Key-words: Jandaíra aquifer; Karstification; hydrodynamic parameters; anisotropy.

Sumário

AGRADECIMENTOS	III
RESUMO	IV
ABSTRACT	V
SUMÁRIO.....	VI
LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	X
Capítulo 1 - Introdução	11
1.1 Introdução e Aspectos Metodológicos.....	12
1.2 Objetivos	14
1.3 Localização da Área de Estudo	14
1.4 Aspectos Fisiográficos e Sócio-Econômicos.....	16
1.4.1 Clima	16
1.4.2 Cobertura Vegetal	16
1.4.3 Solos	16
1.4.4 Relevo	17
1.4.5 Hidrografia	17
1.4.6 - Aspectos Econômicos.....	17
Capítulo 2 - Contexto Geológico.....	18
2.1 Geologia Regional	19
2.1.1 Introdução.....	19
2.1.2 Evolução Tectonossedimentar da Bacia Potiguar	19
2.1.2.1 Supersequência Rifte	19
2.1.2.2 Supersequência Pós-Rifte	20
2.1.2.3 Supersequência Drifte	20
2.1.2.4 Magmatismo.....	22
2.1.3 Arcabouço Estrutural	23
2.1.4 Litoestratigrafia	24

2.2 Geologia Local.....	27
Capítulo 3 - Estado da Arte da Hidrogeologia dos Aquíferos Cársticos	35
Capítulo 4 - Balanço hídrico e caracterização climática	41
Capítulo 5 - Hidrogeologia do Aquífero Cárstico Jandaíra	51
5.1 Contexto da Hidrogeologia regional.....	52
5.2 Comportamento Observado na Região de Baraúna	55
5.2.1 Trabalhos Realizados	55
5.2.2 Uso das Águas	56
5.2.3 Parâmetros Hidrodinâmicos.....	60
5.2.4 Potencialidades das Águas Subterrâneas	61
5.2.4.1 Espessura do Aquífero	62
5.2.4.2 Estimativa das Reservas Permanentes e Reguladora.....	62
5.2.4.3 Fluxo das Águas Subterrâneas.....	64
5.2.4.4 Modelo Hidrogeológico Conceitual.....	66
5.2.5 Superexploração do Aquífero e a Influência das Secas.....	71
5.2.5.1 Estimativa de Recarga	81
Capítulo 6 - Conclusões e Recomendações	85
Capítulo 7 - Referências	88
Capítulo 8 - Artigo Submetido ao Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi	95

Lista de Figuras

Figura 1.1: Mapa de localização da área de estudo.	15
Figura 2.1: Arcabouço estrutural da Bacia Potiguar. Modificado de Bertani et al, 1990.....	24
Figura 2.2: Carta estratigráfica da Bacia Potiguar. De Pessoa Neto et al., (2007).	26
Figura 2.3: Mapa de zoneamento de resistividade. Modificado de Feitosa, 2004.	28
Figura 2.4: Afloramento da Formação Jandaíra no Lajedo dos Macacos.	29
Figura 2.5: Sumidouro circular, feição cárstica comum na região.	29
Figura 2.6: Perfil de poço de bombeamento localizado no setor oeste da área de pesquisa, Mina Mizu.	30
Figura 2.7: Perfil de poço de bombeamento localizado no setor oeste da área de pesquisa, Mina Mizu.	31
Figura 2.8: Perfis litológicos do setor de maior nível de carstificação. De Medeiros (2006).	32
Figura 2.9: Perfis litológicos do setor com intercalações de folhelhos. De Medeiros (2006).	33
Figura 2.10: Bloco diagrama do campo de esforços em ambiente extensional, que resume as relações entre as estruturas verificadas na área de estudo. Destaque para os estilólitos (horizontais) e as fraturas naturais (verticais).	34
Figura 3.1: Desenvolvimento do aquífero cárstico pela infiltração de águas superficiais: (A) Estágio Inicial; (B) Estágio Avançado. Modificado de Mandel e Shiftan, 1981.	36
Figura 3.2: Ilustração das diferenças de características hidráulicas dos diferentes tipos de aquíferos. Modificado de Freeze e Chery (1979).	39
Figura 3.3: Diagrama trilinear de Piper das águas no aquífero Jandaíra-RN. SEMARH, 2014.	40
Figura 4.1: Gráfico de precipitação média mensal (mm). Fonte: INMET, 2009.	43
Figura 4.2: Fatores que influenciam nos componentes primários do ciclo hidrológico. Gráficos obtidos com dados da estação meteorológica de Mossoró-RN.	44
Figura 4.3: Balanço hídrico da região de Baraúna.	49
Figura 5.1: Mapa de aquíferos do Rio Grande do Norte. Modificado de SEMARH, 2014.	54
Figura 5.2: Situação da área de estudos e poços cadastrados. Fonte: Medeiros, A. B. (2006).	58

Figura 5.3: Mapa potenciométrico do aquífero Jandaíra na área de estudo. Modificado de Medeiros, A. B. (2006).	65
Figura 5.4: Bloco diagrama representativo do modelo hidrogeológico conceitual do aquífero Jandaíra na região de Baraúna.	68
Figura 5.5: Modelo representativo para a área de maior nível de carstificação.	70
Figura 5.6: Modelo representativo para a área de menor nível de carstificação, área da Mina Mizu.	71
Figura 5.7: Poços monitorados pela SEMARH com pelo menos 20 medidas de NE.	73
Figura 5.8: Distribuição dos poços com mais de 20 medidas de NE próximos a MIZU.	74
Figura 5.9: Evolução do NE em cinco pontos do aquífero Jandaíra e da precipitação em Baraúna no período de 2003 a 2013.	76
Figura 5.10: Evolução do NE em cinco pontos do aquífero Jandaíra e da precipitação em Baraúna no período de 2003 a 2013.	77
Figura 5.11: Determinação de Δh . Adaptado de Healy e Cook, 2002.	83

Lista de Tabelas

Tabela 4.1: Valores médios mensais de precipitação na região de Baraúna e Mossoró (período de 1974 a 2008). Fonte: INMET, 2009.	42
Tabela 4.2: Valores médios mensais dos elementos climáticos na estação de Mossoró/RN (período de 1974 a 2008). Fonte: INMET, 2009.	45
Tabela 4.3: Valores obtidos da evapotranspiração potencial ETp.	47
Tabela 4.4: Resultados do balanço hídrico da região de Baraúna (valores em mm).	48
Tabela 4.5: Tipo de clima, segundo o valor do índice global anual (i).	50
Tabela 5.1: Distribuição global e para o aquífero Jandaíra dos poços cadastrados quanto à propriedade do terreno em setembro de 2002 e em setembro de 2009 na região entre Baraúna e Quixeré. Fonte: ANA, 2010.	59
Tabela 5.2: Relação dos principais usuários de águas subterrâneas do aquífero Jandaíra na região entre Baraúna e Quixeré.	60
Tabela 5.3: Parâmetros hidráulicos do aquífero Jandaíra em Furna de Pedra.	61
Tabela 5.4: Frequência das medidas de nível estático.	72
Tabela 5.5: Cálculo de Δh , recarga e taxa de recarga para seis poços no ano de 2008.	83

CAPÍTULO 1 – Introdução

1 – INTRODUÇÃO

1.1 – INTRODUÇÃO E ASPECTOS METODOLÓGICOS

Este trabalho compreende a realização de estudos hidrogeológicos na região do Município de Baraúna, no extremo oeste da Bacia Potiguar, estado do Rio Grande do Norte, em área conhecida geologicamente como Plataforma Aracati, e geomorfologicamente como Chapada do Apodi, onde aflora a formação Jandaíra. O calcário constitui um aquífero cárstico e é alvo desse estudo. Em caráter geral é um bom condutor hidráulico, devido a seu elevado nível de carstificação, e reconhecido com elevado potencial hidrogeológico apesar do caráter anisotrópico que lhe confere localmente condições adversas quanto as potencialidades e condições de exploração das águas subterrâneas.

Como observado em trabalhos realizados na região, o número de poços perfurados captando água do Aquífero Jandaíra vem aumentando a taxas elevadas como também as vazões de exploração, gerando com isto impactos sobre os recursos hídricos (ANA, 2010). O problema de superexploração dessas águas, atrelado a ocorrência de secas podem estar afetando de forma desequilibrada os níveis de água na região, com rebaixamento de níveis até cerca de 50 metros, como mostraram SERHID (2003), Medeiros (2006) e ATEPE (2010).

O município de Baraúna tem uma população estimada em 26.799 habitantes e uma área de 825,682 Km² (IBGE, 2010). Atualmente o município enfrenta graves problemas de superexploração das águas do aquífero Jandaíra o que tem se atribuído ao intenso uso na fruticultura irrigada, cujo problema possivelmente ocorre pela falta de planejamento adequado do uso das águas (SERHID, 2003).

Este trabalho tem por finalidade a avaliação do comportamento hidrogeológico do sistema aquífero cárstico Jandaíra, tendo em vista os problemas associados à ausência de chuvas e superexploração das águas subterrâneas, se consubstanciando, portanto, numa ferramenta de gestão. Serão observados fatores petrográficos, estruturais e principalmente hidrogeológicos com o intuito de avaliar suas condições de uso e de potencialidades hidrogeológicas.

Para a elaboração do trabalho foram incluídas 8 etapas destacadas e descritas a seguir:

- *Coleta e análise de dados existentes*

Inicialmente foi realizado uma ampla pesquisa bibliográfica e cartográfica com o intuito de conhecer os estudos regionais e locais anteriormente elaborados, principalmente dados climáticos, hidrológicos, hidrogeológicos e hidroquímicos; com destaque para perfis construtivos e litológicos de poços, resultados de testes de bombeamento e resultados de análise química de águas;

- *Interpretação de imagens e elaboração de mapas*

Foram elaborados os mapas “base” para realização dos trabalhos de campo, utilizando-se o software *Arcgis 10.1 (ESRI)*. O software *CorelDraw X7* foi utilizado na finalização dos mapas e figuras;

- *Elaboração de perfis e seções hidrogeológicas*

A partir de informações geológicas, topográficas e perfis de poços foram elaboradas seções hidrogeológicas no domínio da área de estudo, tendo em vista a caracterização da estrutura geológica e elaboração do modelo hidrogeológico conceitual, componentes fundamentais na análise potencial e de avaliação dos possíveis impactos ambientais;

- *Parâmetros hidrodinâmicos do aquífero Jandaíra*

A partir da interpretação de resultados de testes de bombeamento dos poços na região, foram estimados os parâmetros hidráulicos e hidrodinâmicos do aquífero Jandaíra;

- *Comportamento do fluxo subterrâneo*

Com base na configuração da rede de drenagem, caráter geomorfológico e com a integração das informações sobre cargas potenciométricas, foi possível avaliar o caráter geral do fluxo subterrâneo, tendo em vista uma melhor compreensão de fatores de ordem potencial e de possíveis impactos ambientais.

- *Avaliação da recarga das águas subterrâneas*

Na estimativa da recarga foi usada a técnica de variação de carga ou “water table fluctuation methods” mediante a avaliação da recessão com base nos dados de variação do nível d’água.

- *Geração do modelo hidrogeológico conceitual*

A integração dos dados geológicos, estruturais e hidrogeológicos levou à caracterização do modelo hidrogeológico conceitual com diferentes comportamentos em termos potenciais e ambientais.

1.2 – OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é apresentar uma avaliação hidrogeológica da região de Baraúna, com ênfase nas avaliações de reservas e recargas do Aquífero Jandaíra e na construção do modelo hidrogeológico conceitual, além disso, é apresentada uma integração de informações que possibilitam uma compreensão de aspectos hidrogeológicos importantes, utilização da água e problemas relacionados a superexploração e estiagem hídrica.

1.3 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada no oeste potiguar, município de Baraúna - RN, próximo ao município de Mossoró-RN, abrangendo uma superfície de cerca de 675 Km² (**Figura 1.1**). A oeste encontra-se o estado do Ceará e a leste o município de Mossoró. O caminho mais fácil e seguro para se chegar até a área de estudo tendo como ponto de partida Natal-RN, é pela BR – 101 até Parnamirim, entrando em seguida na BR – 304 até a cidade de Mossoró, a partir daí o acesso é pela RN – 015 até a cidade de Baraúna – RN, totalizando 314 km.

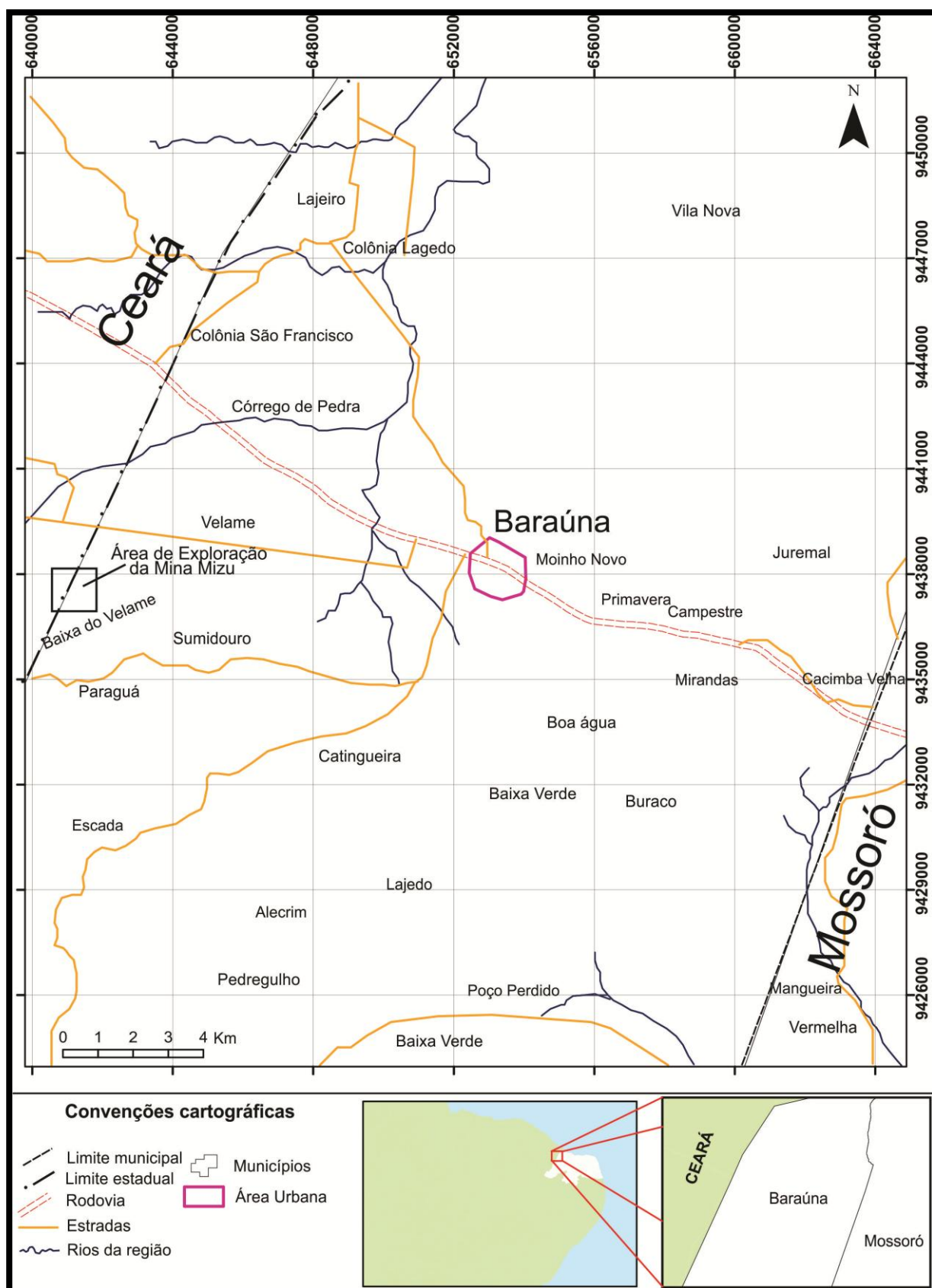


Figura 1.1: Mapa de localização da área de estudo.

1.4 – ASPECTOS FISIAGRÁFICOS E SÓCIO-ECONÔMICOS

1.4.1 – Clima

A região tem como clima, característico do tipo “semi-árido”, com baixa umidade e baixa precipitação pluviométrica. Tem períodos prolongados de estiagem e chuvas concentradas nos primeiros meses do ano, nos meses que vão de março a junho com média pluviométrica de cerca de 750 mm/ano. A temperatura média anual é em torno de 27,4°C, mínima de 21°C e máxima de 36°C (DNOCS, 2009) e a umidade relativa do ar é de cerca de 68%.

Os menores valores de evapotranspiração (ETP) ocorrem no trimestre de transição do período chuvoso para o período de estiagem entre os meses de maio e julho com valores oscilando em torno de 4 mm/dia. No semestre de setembro a fevereiro os valores da ETP média diária ficam compreendidos entre 5 mm/dia e 6 mm/dia (Cunha & Millo, 1984).

1.4.2 – Cobertura Vegetal

A cobertura vegetal predominante na região é a Caatinga, com presença arbustiva geralmente seca devido ao clima semi-árido característico da região, destacando-se o Faveleiro, Marmeleiro, Jurema-preta, Mufumbo, Xique-xique e Facheiro (Fonte: IDEMA, 2009).

1.4.3 – Solos

Podem ser encontrados solos do tipo latossolo vermelho amarelo eutrófico, rendzina e cambissolo eutrófico (Fonte: IDEMA, 2009). Segundo Câmara (2010) o solo latossolo vermelho amarelo eutrófico apresenta uma fertilidade média a alta, com textura média, extremamente drenado e relevo plano. Já o solo rendzina oferece aptidões regulares e restritas para pastagens naturais e lavouras, apresentando alta fertilidade e uma textura argilosa, onde se mostram de boa qualidade para o cultivo de algodão, coco, caju e sisal, cultivados sobre um relevo plano. O cambissolo eutrófico é um solo de fertilidade alta, apresenta textura argilosa, moderadamente drenada e seu relevo é plano.

1.4.4 – Relevo

A área está localizada no domínio da Chapada do Apodi com uma altitude que varia de cerca de 40 m a 100 m. Apesar disso trata-se de uma unidade aplainada, formada por rochas sedimentares do Calcário Jandaíra. Destacam-se principalmente as feições cársticas de lajedos aparentes.

1.4.5 – Hidrografia

O regime hidrográfico da área é controlado por pequenos riachos e córregos, destacando-se o Córrego de Pedras, localizado na porção norte da área. De acordo com Medeiros (2006), O Município encontra-se com 43,78% do seu território inserido na bacia hidrográfica Apodi-Mossoró e 56% na faixa norte de escoamento difuso. A região é caracterizada por feições cársticas, que contribui para a ausência de cursos d'água superficiais.

1.4.6 – Aspectos Econômicos

No domínio da área está localizada a cidade de Baraúna que tem como principal atividade a fruticultura irrigada e atualmente apresenta investimentos na extração de calcário e produção de cimento pela Mizu cimentos. Têm uma população estimada em 26.799 habitantes e uma área de 825.682 Km² (IBGE, 2010).

CAPÍTULO 2 – Contexto Geológico

2 – CONTEXTO GEOLÓGICO

2.1 – GEOLOGIA REGIONAL

2.1.1 – Introdução

A Bacia Potiguar corresponde a uma área localizada no extremo nordeste brasileiro, abrangendo os estados do Rio Grande do Norte e Ceará. Ela representa uma área total de 48.000 km² (**Figura 2.1**). A porção emersa dessa área corresponde a 21.500 km² e a porção submersa (plataforma e talude continentais) 26.500 km² (BERTANI et al., 1990). Em seu contexto geológico, a Bacia Potiguar limita-se a noroeste pela Bacia do Ceará (Alto de Fortaleza), a leste com a Bacia de Pernambuco-Paraíba (pelo Alto de Touros), e a sul, com as rochas do embasamento pré-cambriano.

A Bacia Potiguar está instalada principalmente sobre rochas paleoproterozóicas do domínio Rio Piranhas e rochas neoproterozóicas da Faixa Seridó (Oliveira, 2008). De Castro et al. (2012) sugerem com base em dados gravimétricos e magnetométricos, que a Bacia Potiguar foi desenvolvida seguindo o *trend* tectônico das zonas de cisalhamento pré-cambrianas adjacentes. A Falha de Carnaubais, que é a principal falha do sistema rifte da bacia representaria uma reativação da Zona de Cisalhamento Portalegre.

2.1.2 - Evolução Tectonossedimentar da Bacia Potiguar

De acordo com Pessoa Neto et al. (2007), o preenchimento sedimentar da Bacia Potiguar está intimamente relacionado com as diferentes fases de sua evolução tectônica: duas fases de rifteamento (Rifte I e Rifte II), cujo registro estratigráfico é correspondente ao conjunto de sequências continentais que compõem a Supersequência Rifte; uma fase aqui denominada pós-Rifte, que corresponde a Supersequência do mesmo nome, e a fase Termal constituída pelos conjuntos de sequências marinhas transgressivas e regressivas, que compõem a Supersequência Drifte. A seguir está a definição da carta estratigráfica PETROBRAS (Bacia Potiguar - Pessoa Neto et al., 2007).

2.1.2.1 - Supersequência Rifte

Correspondem ao preenchimento da bacia durante as fases Rifte I e Rifte-II. A fase Rifte I (Neoberriasiano/ Eobarremiano) é caracterizada por um regime tectônico de estiramento crustal, com altas taxas de subsidência mecânica do embasamento. Se

desenvolvem falhas com até 5.000 m de rejeito, preferencialmente normais, de direção geral NE-SW. Essas calhas tectônicas foram preenchidas pelos depósitos lacustrinos, fluvio-deltaicos e fandeltaicos que constituem a Formação Pendência.

A ocorrência de sedimentos da fase Rifte I na porção submersa da bacia está restrita ao prolongamento do rifte emerso na direção NE, sendo pouco amostrada por poços devido à grande profundidade dos mesmos. No entanto, a correlação com as sequências identificadas no rifte emerso torna-se bastante complexa devido às bruscas variações de fácies e à baixa resolução dos métodos de datação bioestratigráfica.

A fase Rifte II (Neobarremiano/Eo-Aptiano) é caracterizada pela implantação do regime transcorrente/ transformante ao longo da futura margem equatorial, causando uma grande mudança na cinemática do rifte. Na Bacia Potiguar, este evento provoca um deslocamento do eixo de rifteamento para a porção submersa da bacia, ao mesmo tempo em que causa levantamento e erosão na porção emersa, que se comporta como uma ombreira do novo rifte. A direção de transporte tectônico muda de NNW para E-W, com movimentos predominantemente transtensionais destrais, em resposta ao início do processo de deriva continental.

2.1.2.2 - Supersequência Pós - Rifte

O intervalo Aptiano – Albiano na Bacia Potiguar é marcado pela passagem gradativa de sistemas deposicionais continentais para marinhos. O regime tectônico dominante nesta fase é marcado por subsidência térmica que sucede ao evento de afinamento litosférico e crustal (fase Rifte), aqui denominada de fase Pós-rifte.

A sedimentação desta fase é dominada por sistemas deposicionais flúvio-lacustres, cujos depósitos encontram-se assentados diretamente sobre uma forte discordância angular no topo da seção rifte. O registro litológico dessa sequência é representado pelos sedimentos transicionais da Formação Alagamar, depositados em regime tectônico de relativa quietude que caracteriza essa fase.

2.1.2.3 - Supersequência Drifte

Esta supersequência compreende toda a sedimentação marinha ocorrida a partir do Albiano Inferior. Ela pode ser dividida em dois conjuntos de sequências: as Sequências

Marinhas Transgressivas, de idade Eoalbiano – Eocampaniano, e as Sequências Marinhas Regressivas, de idade Neocampaniano – Holoceno.

Sequências Marinhas Transgressivas

Nesta fase, a bacia experimenta taxas mais modestas de subsidência, com o depocentro principal formando uma grande calha fluvial de orientação geral NE-SW. Esse sistema passava gradativamente em direção ao mar para uma plataforma rasa siliciclástica a mista, com a implantação de sedimentação carbonática de borda de plataforma e um sistema de talude/bacia marcado pela formação de cânions submarinos com sedimentação turbidítica associada. Os cânions de Pescada e Ubarana, escavados neste período, foram preenchidos predominantemente por folhelhos de talude, intercalados com camadas de turbiditos, diamictitos e olistolitos carbonáticos.

As Sequências Transgressivas que registram este período têm início com a deposição da seção fluvial a marinha representada pelos sedimentos siliciclásticos proximais (Formação Açu) e marinhos distais (Formação Quebradas), bem como pelos depósitos carbonáticos marinhos rasos (Formação Ponta do Mel).

O máximo transgressivo dessa sequência ocorreu na passagem Cenomaniano - Turoniano, sendo marcado pela deposição de uma seção de folhelhos contínuos na porção submersa da bacia e pelo afogamento dos sistemas fluviais e estuarinos na porção emersa. Segue-se a implantação de uma plataforma/rampa carbonática dominada por maré (Formação Jandaíra), cujos sedimentos mais novos apresentam idade eocampaniana. As rochas carbonáticas da Formação Jandaíra afloram em praticamente toda a porção emersa da Bacia Potiguar, onde se encontra intensamente erodida e carstificada, e mergulha com baixa inclinação em direção ao Oceano Atlântico.

O limite do pacote carbonático da Formação Jandaíra com os arenitos da Formação Açu sotopostos é concordante e representa a superfície de inundação máxima do Cretáceo Superior na bacia. Na porção emersa, a região deste contato constitui uma expressiva cuesta que se estende por todo o Estado do Rio Grande do Norte e parte do Estado do Ceará, configurando um relevo em chapada, conhecida como Chapada do Apodi. O padrão estratificados sedimentos dessa sequência consiste de estratos com mergulhos suaves e clinoformassigmoidais típicas de bacias de margem em rampa.

Sequências Marinhas Regressivas

A partir de um evento erosivo de grande magnitude durante o Neocampaniano, ocorre um grande ciclo de sequências regressivas que se estende até o Holoceno. Um evento transgressivo importante foi registrado na base deste ciclo, representado por uma seção condensada conhecida como Marco Radioativo, de idade neocampaniana, que se encontra assentado diretamente sobre o limite basal da megassequência.

Dentro deste ciclo regressivo foram individualizadas pelo menos sete sequências deposicionais, limitadas por eventos erosivos regionais. Essas sequências estão preservadas quase exclusivamente na porção submersa da bacia, em especial aquela do Cretáceo Superior e Paleógeno. Os únicos registros aflorantes dessas sequências na porção emersa ocorrem sob a forma de depósitos de leques costeiros proximais de idade miocênica.

As Sequências Regressivas (K100-E10 a N60) representam o registro estratigráfico na bacia entre o Neocampaniano e os dias atuais. Caracterizam-se por sistemas mistos compostos por leques costeiros, sistemas de plataformas rasas com borda carbonática e sistemas de talude/bacia. Os correspondentes litoestratigráficos dessas sequências são as rochas definidas nas formações Barreiras, Tibau, Guamaré e Ubarana.

O. As Sequências Basais (E20 a N10) apresentam clinoformas mais oblíquas com quebras de plataformas mais abruptas e bem definidas, mostrando um evidente domínio de feições progradacionais, com predomínio de fácies de talude da Formação Ubarana. Na porção mais profunda ocorrem turbiditos intercalados com folhelhos de talude e derrames vulcânicos terciários (basaltos da Formação Macau na área do Cânion de Agulha).

Os sedimentos conglomeráticos imaturos da Formação Serra do Martins, que ocorrem sobre platôs do embasamento ao sul da Bacia Potiguar, são interpretados como parte desse evento regressivo, depositados na porção mais continental do mesmo. O crescente influxo de terrígenos na plataforma do sistema Barreiras-Tibau-Guamaré, durante o Mioceno, deve-se a um acentuado incremento da erosão do relevo pós-cretáceo da província Borborema.

2.1.2.4 - Magmatismo

Três eventos magmáticos principais são identificados na Bacia Potiguar: Rio Ceará Mirim, Cuó e Macau. O evento magmático conhecido como Formação Rio Ceará Mirim ocorre na forma de diques de diabásio com forte orientação E-W no embasamento adjacente à borda sul da Bacia Potiguar. Este enxame de diques está relacionado à gênese do rifte, datado com base nos dados $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, com pulso em $132,2 \pm 1$ Ma. A ocorrência de rochas

vulcanoclásticas intercaladas aos sedimentos da porção basal da Formação Pendência, na porção emersa da bacia, também é correlacionada com este evento.

O evento magmático conhecido como Formação Serra do Cuó, definido com base em afloramento localizado na borda sul da Bacia Potiguar, ocorre na forma de derrames de basalto com tendência alcalina, apresentando idades radiométricas (Ar-Ar) com idade de $93,1 \pm 0,8$ Ma (Souza et al. 2004).

O evento magmático conhecido como Formação Macau ocorre intercalado aos sedimentos da sequência regressiva e no embasamento adjacente à bacia, sendo datados pulsos no Eoceno/Oligoceno com idades distribuídas entre 70-65 e 9-6 Ma, com picos entre $48,9 \pm 2,9$ e $31,4 \pm 1,5$ Ma.

2.1.3 - Arcabouço estrutural

O arcabouço estrutural da Bacia Potiguar compreende três unidades básicas (Bertani et al, 1990): grabens, altos internos e plataformas do embasamento (**Figura 2.1**), que contém sequências sedimentar distintas Neocomiana à Terciária.

A arquitetura da Bacia Potiguar exhibe três principais elementos estruturais: i) baixos internos, nos quais se destacam o Apodi, Guamaré e Boa Vista, localizados na parte emersa, com feições lineares NE-SW e limitados por falhas normais NE-SW e NW-SE. Na parte submersa, os baixos possuem eixos com direção paralela à atual linha de costa; ii) altos internos, nos quais se destacam Quixabá, Serra do Campo e Macau. Estes altos se dispõem como cristas do embasamento, alongadas subparalelamente ao eixo dos baixos adjacentes, e limita-se a NW por falhas antitéticas de grande rejeito e a SE por falhas sintéticas que mostram um mergulho suave em direção a bacia e; iii) plataformas do embasamento, formadas pelas plataformas de Touros e de Aracati, com feições rasas que limitam os baixos a leste e a oeste, respectivamente. A leste, este limite é feito pelos Sistemas de Falhas de Carnaubais/Baixa Grande, de direção SW-NE, e a oeste pelo Sistema de Falhas de Areia Branca, de direção SW-NE. As rochas que compõem o embasamento no interior dessas plataformas são pouco afetadas por falhas (BERTANI et al, 1990).

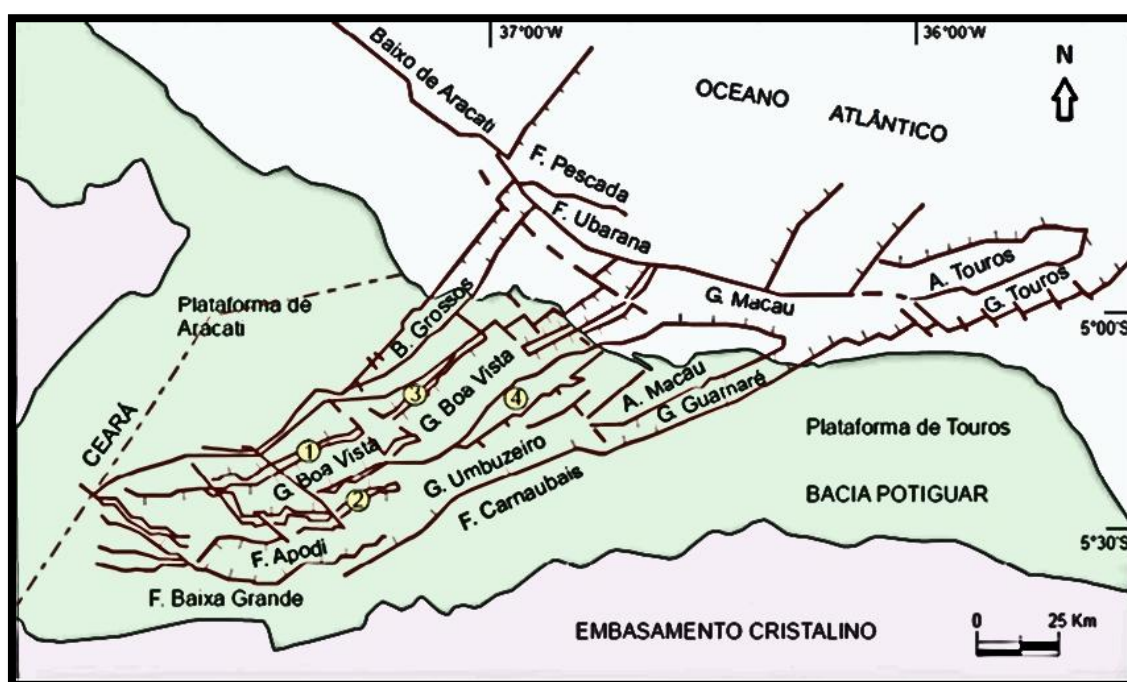


Figura 2.1: Arcabouço estrutural da Bacia Potiguar. Modificado de Bertani et al, 1990.

2.1.4 – Litoestratigrafia

Estudos como Sampaio e Schaller (1968) e Araripe e Feijó (1994) ajudaram a compreender a litoestratigrafia da Bacia Potiguar. Estes autores dividiram a Bacia Potiguar em três grupos (da base para o topo): Areia Branca, Apodi e Agulha (**Figura 2.2**). O Grupo Areia Branca, predominantemente siliciclástico, engloba as formações Pendência, Pescada e Alagamar. O Grupo Apodi, intermediário, engloba as formações Açú, Ponta do Mel, Jandaíra e Ubarana, depositadas desde Eoalbiano até o Eocampaniano, exibindo um aumento significativo de rochas carbonáticas para o topo. O Grupo Agulha é composto, da base para o topo, pelas formações Ubarana, Guamaré, Tibau e Barreiras, de composição siliciclásticas e carbonáticas de alta e baixa energia (ARARIPE e FEIJÓ, 1994).

O **Grupo Areia Branca** possui conteúdo predominantemente siliciclástico e ocorre sobreposto ao embasamento cristalino de forma discordante, reunindo as formações Pendência, Pescada e Alagamar, de idades que variam desde o Valanginiano ao Paleó-Albiano.

O **Grupo Apodi** é formado por rochas siliciclásticas e carbonáticas das formações Açú, Ponta do Mel, Quebradas e Jandaíra, que datam do Albiano ao Campaniano. Rochas siliciclásticas e carbonáticas do Grupo Agulha, que abrange as formações Ubarana, Guamaré,

Tibau e Barreiras, foram depositadas no intervalo de tempo que varia do Campaniano ao Plioceno. Associados a estas unidades litoestratigráficas sedimentares, ocorreram eventos magmáticos: Magmatismo Rio Ceará-Mirim (Toarciano ao Albiano), Magmatismo Serra do Cuó (Santoniano e Campaniano) e Magmatismo Macau (Oligocênio ao Mioceno).

- **Formação Jandaíra**

Formação Jandaíra, cuja deposição ocorreu em plataforma/rampa carbonática de mar raso, durante o Turoniano ao Eocampaniano. Esta formação aflora em praticamente toda a área de estudo, onde se encontra intensamente carstificada e erodida. As rochas carbonáticas da Formação Jandaíra dispõem-se concordantemente sobre as rochas siliciclásticas das formações Açu e Quebradas, e encontram-se parcialmente recobertas por depósitos colúvio-eluviais. Os estratos da Formação Jandaíra são compostos por mudstones a grainstones bioclásticos, intraclásticos e calcários litográficos, com eventuais intercalações de arenitos, folhelhos, margas e evaporitos (Córdoba, 2001). O aquífero desenvolvido nesses depósitos é do tipo cárstico-fissural livre (Manoel Filho et al., 2003).

O **Grupo Agulha** relaciona-se com a fase regressiva e abrange os sistemas de leques costeiros, plataforma e talude. Seus sedimentos foram depositados entre o Neocampaniano e o Recente composto pelas Formações Ubarana, Guamaré, Tibau e Barreiras (Araripe, P. T. & Feijó, F. 1995; Pessoa Neto, O. C. 1999).

A idade das rochas da Formação Barreiras ainda é motivo de debate, embora sua correlação com o Grupo Agulha seja a mais aceita.

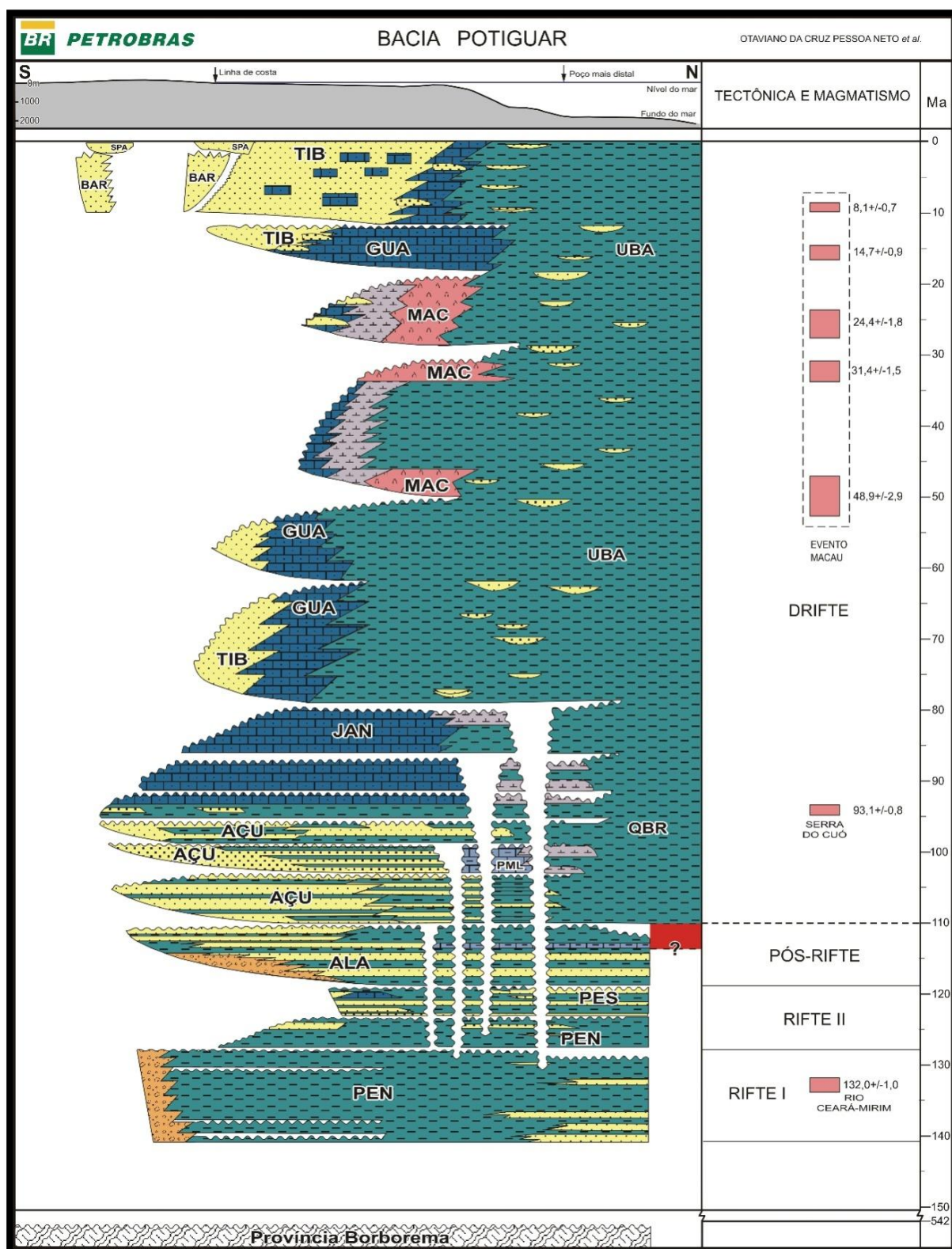


Figura 2.2: Carta estratigráfica da Bacia Potiguar. De Pessoa Neto et al., (2007).

2.2 – GEOLOGIA LOCAL

A área de estudo está inserida na bacia potiguar, grupo Apodi e mais precisamente compreende uma cobertura de carbonatos correspondentes a Formação Jandaíra. Nesse contexto, o calcário num domínio equivalente a área de estudo foi separado em 3 setores distintos do ponto de vista geofísico, de modo que distinguisse níveis de carstificação, conforme mostrado por FEITOSA, 2004 (**Figura 2.3**), que serve como base para o estudo em questão. As feições cársticas presentes na Formação Jandaíra podem ser demonstradas nas **Figuras 2.4 e 2.5**.

Os zoneamentos citados foram separados usando o método de resistividade elétrica e compreendem: **Área relativamente mais carstificada; Área com intercalação de folhelhos e área com ausência relativa de carstificação**. A primeira é representada por trechos com rochas calcárias de nível de carstificação elevada, o que influencia diretamente na geração de condutos maiores e consequentemente encontramos um aquífero com maior transmissividade do que as demais áreas mapeadas. A segunda área compreende o calcário Jandaíra com intercalações de folhelhos, por consequência um aquífero com ausência relativa de carstificação e transmissividade relativamente mais baixa. Na área classificada como ausência relativa de carstificação o calcário tem um menor nível de infiltração de água e dissolução carbonática, e por consequência a ausência relativa de carstificação. Devido à característica heterogênea do aquífero cárstico, mesmo a zona mapeada como mais carstificada pode apresentar trechos com menor nível de carstificação. Nesse tipo de sistema o aquífero existe apenas entre as fraturas e microfraturas do calcário com transmissividade muito baixa.

Para demonstrar e representar a litologia da região foram descritos perfis de poços da área da mina Mizu e integrados ao trabalho de Medeiros (2006) (**Figuras 2.6; 2.7; 2.8 e 2.9**). Além disso, foi elaborado um bloco-diagrama representativo do comportamento estrutural da região (**Figura 2.10**).

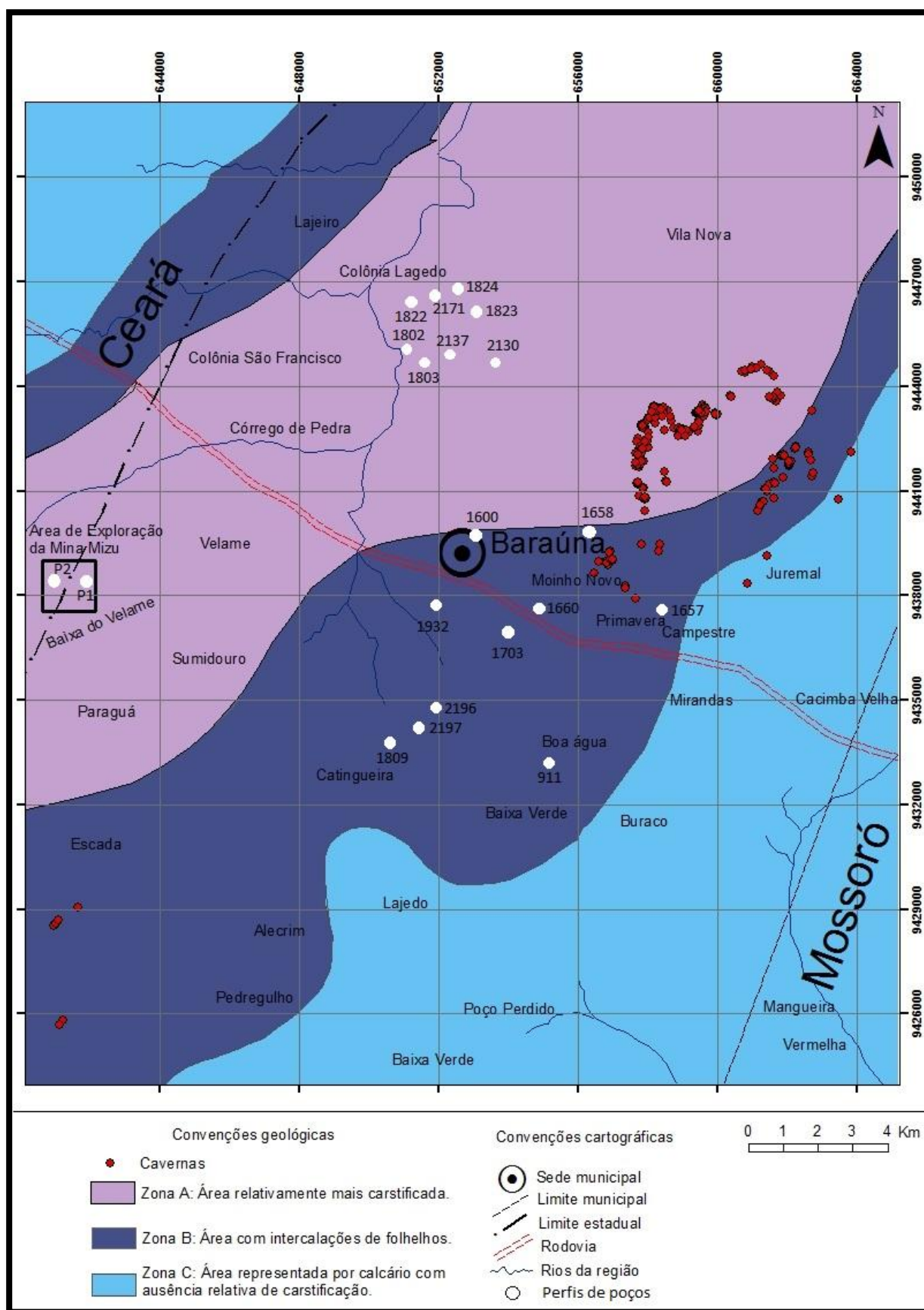


Figura 2.3: Mapa de zoneamento de resistividade. Modificado de FEITOSA, 2004.



Figura 2.4: Afloramento da Formação Jandaíra no Lajedo dos Macacos.



Figura 2.5: Sumidouro circular, feição cárstica comum na região.

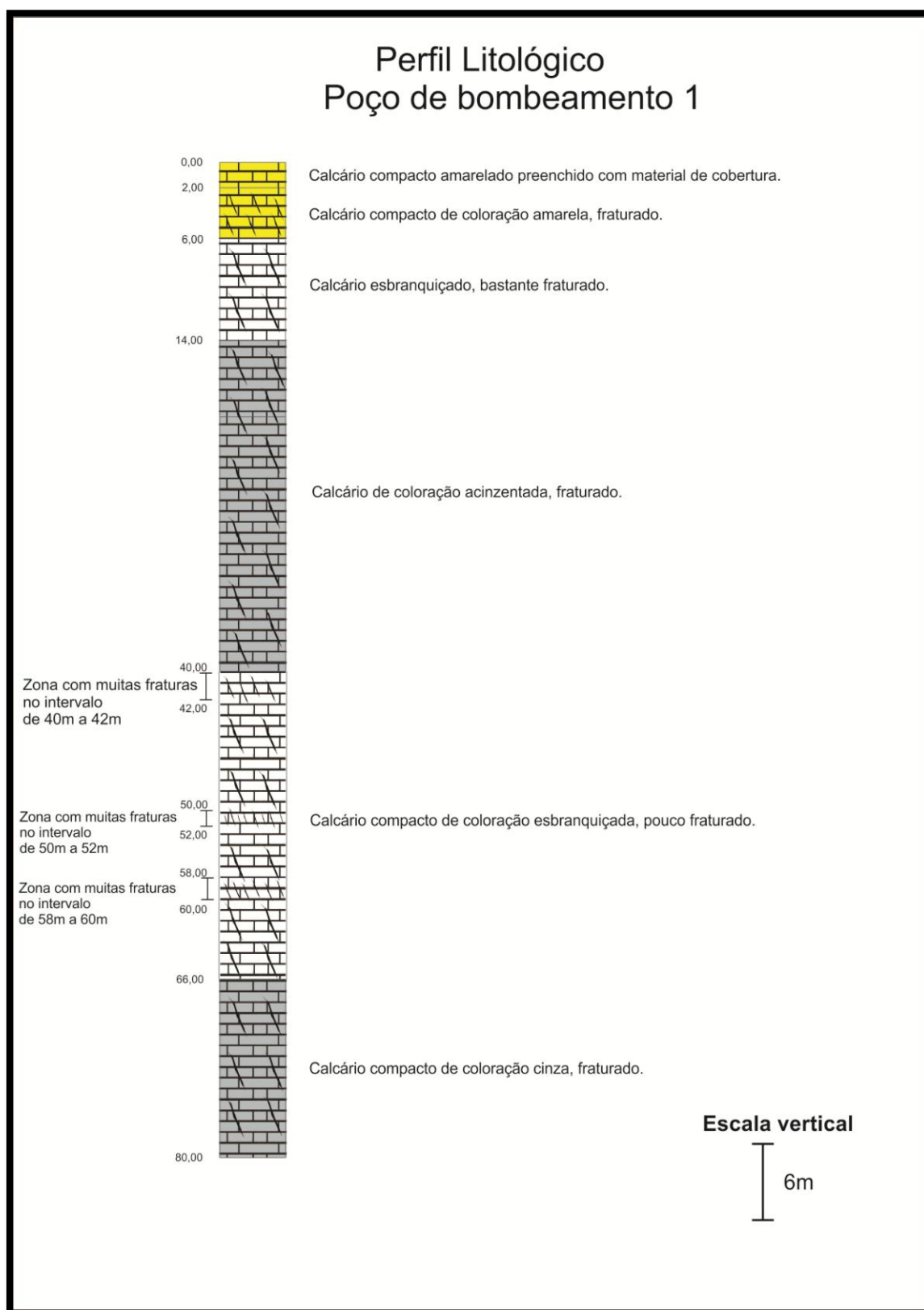


Figura 2.6: Perfil de poço de bombeamento localizado no setor oeste da área de pesquisa, Mina Mizu.

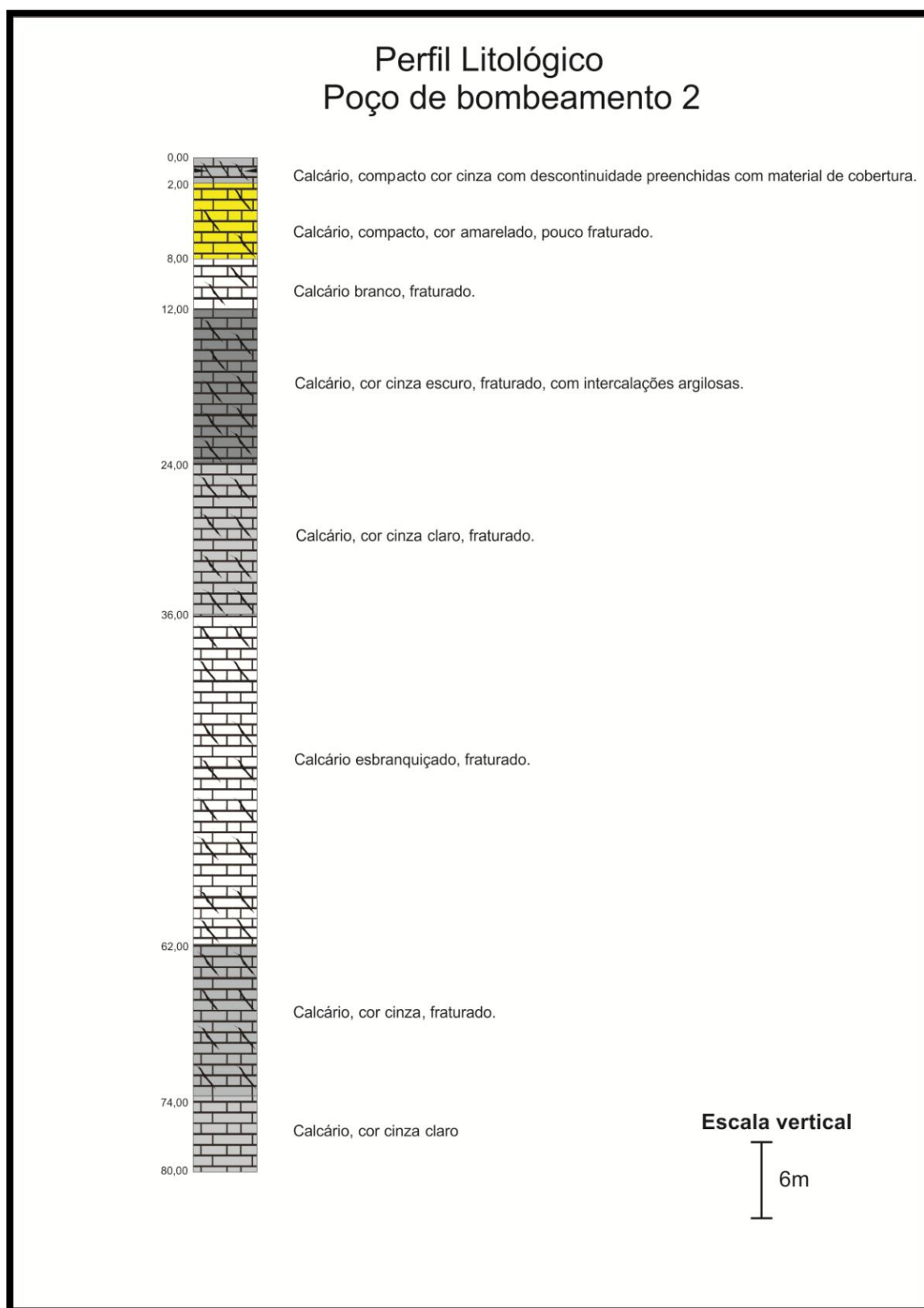


Figura 2.7: Perfil de poço de bombeamento localizado no setor oeste da área de pesquisa, Mina Mizu.

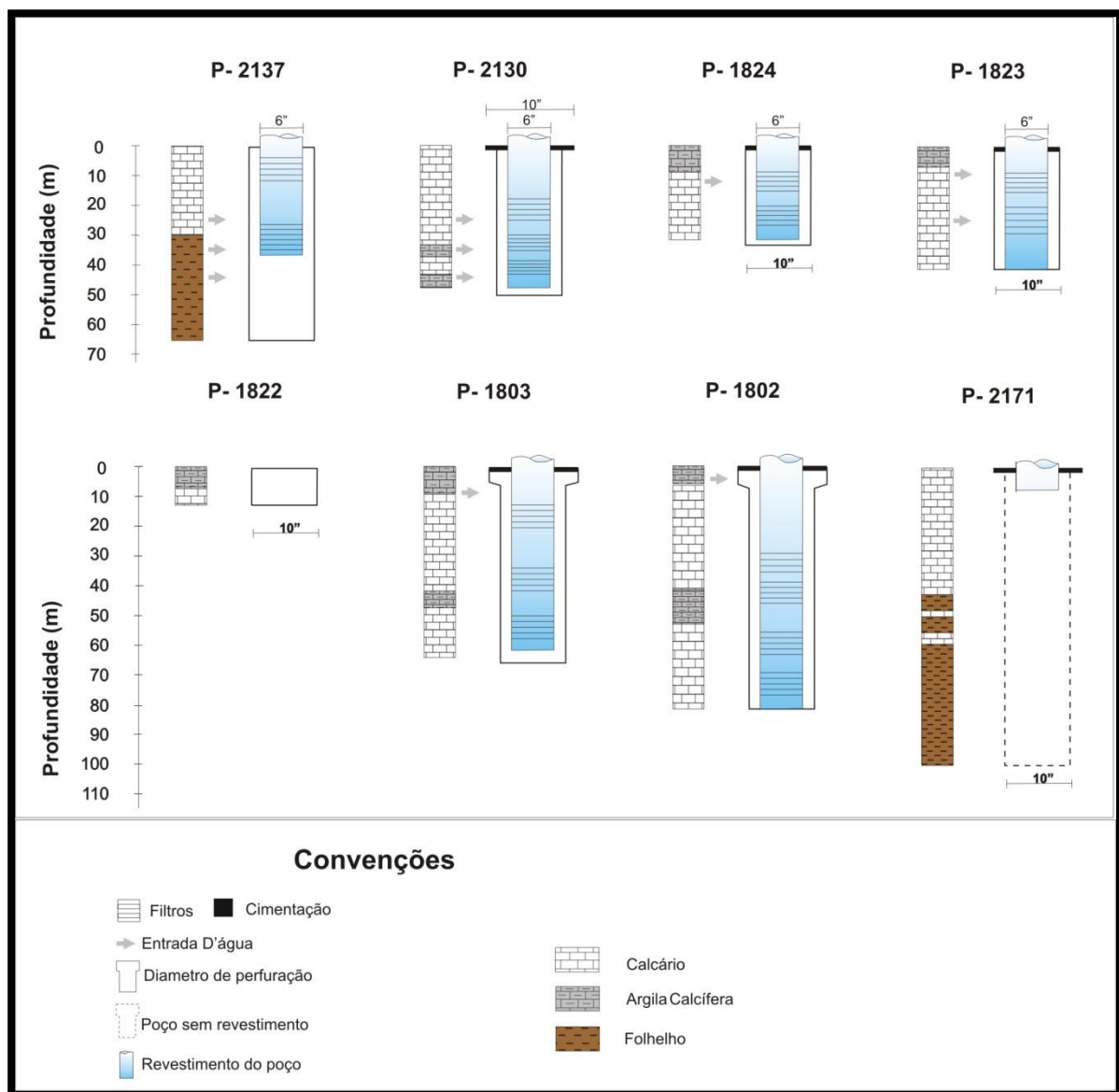


Figura 2.8: Perfis litológicos do setor de maior nível de carstificação. De Medeiros (2006).

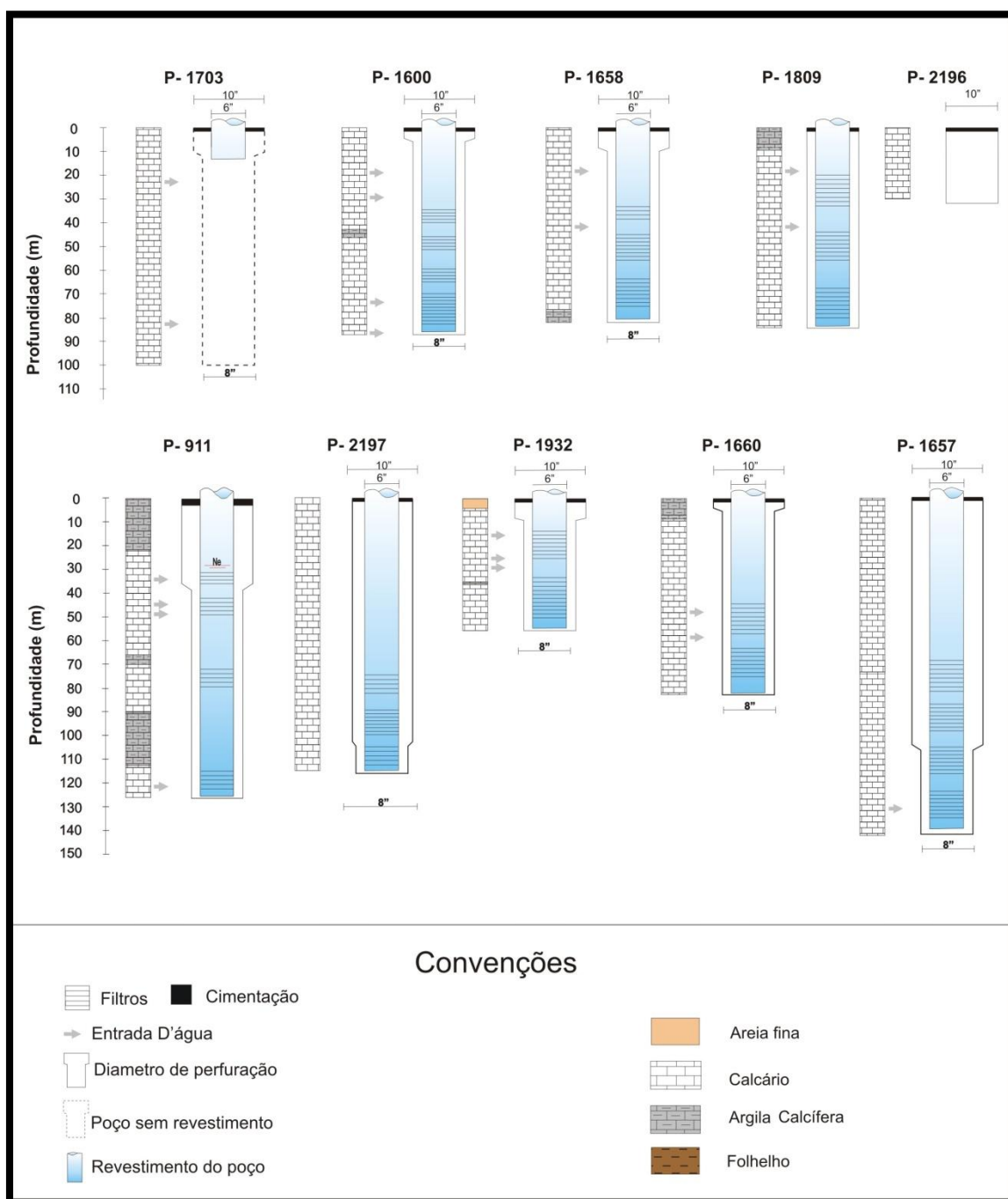


Figura 2.9: Perfis litológicos do setor com intercalação de folhelhos. De Medeiros (2006).

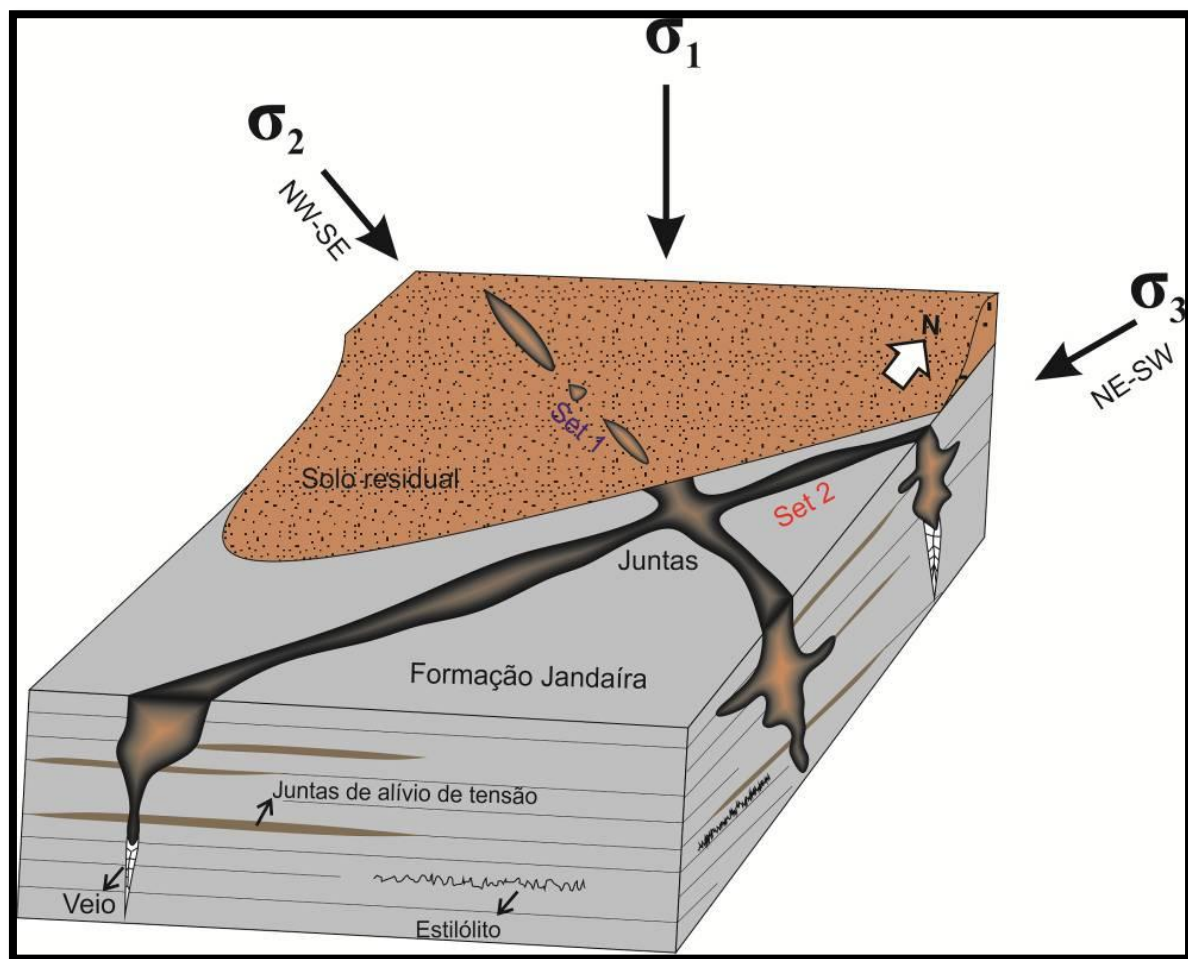


Figura 2.10: Bloco diagrama do campo de esforços em ambiente extensional, que resume as relações entre as estruturas verificadas na área de estudo. Destaque para os estilólitos (horizontais) e as fraturas naturais (verticais).

CAPÍTULO 3 – Estado da arte da hidrogeologia dos aquíferos cársticos

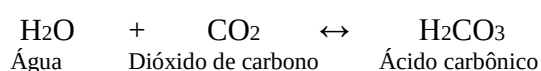
3 - ESTADO DA ARTE DA HIDROGEOLOGIA DOS AQUÍFEROS CÁRSTICOS

Os aquíferos cársticos têm sido cada vez mais alvos de pesquisas pelo mundo, suas peculiaridades e características tem levantado a curiosidade dos cientistas, que não só veem como um importante reservatório, mas também como possível responsável por problemas geotécnicos. Esse tipo de aquífero possui diversos aspectos próprios que dificultam os estudos e mesmo existindo alguns estudos sobre eles, cada nova pesquisa merece atenção especial e adaptação dos métodos as condições encontradas.

A existência ou desenvolvimento do aquífero cárstico, como também de todo sistema cárstico-fissural possui alguns fatores condicionantes: a litologia, que oferece maior capacidade de dissolução da rocha; as estruturas desenvolvidas no corpo rochoso (fraturas, falhas, sumidouros e planos de estratificação), que possibilitam a percolação da água e o contato e dissolução de camadas inferiores do maciço rochoso; e o clima, que de fato será o fator mais importante para a elaboração e desenvolvimento do aquífero, pois é responsável pelo fornecimento da água.

A evolução desse tipo de aquífero está ligada e controlada diretamente por duas reações químicas:

Acidulação da água:



Dissolução carbonática pelas águas ácidas:

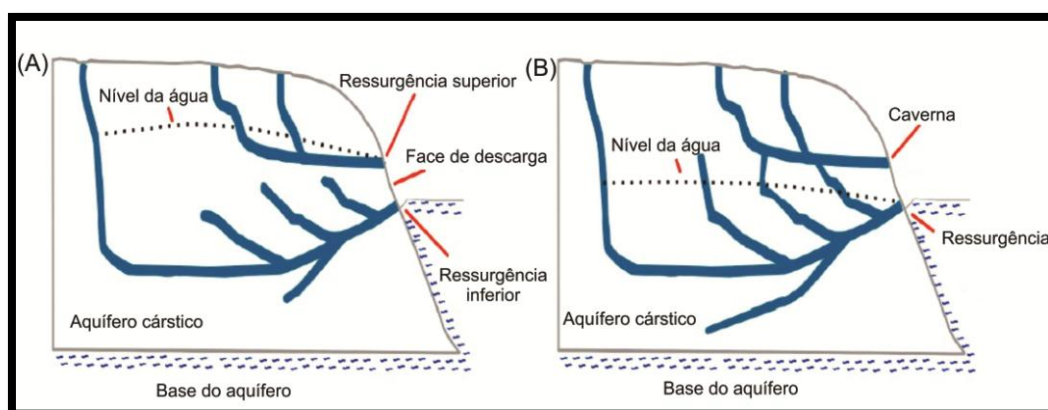
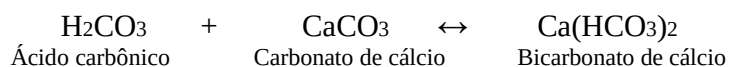


Figura 3.1: Desenvolvimento do aquífero cárstico pela infiltração de águas superficiais: (A) Estágio inicial; (B) Estágio avançado. (Modificado de Mandel & Shiftan, 1981).

De maneira geral, os estudos referentes a águas subterrâneas vêem o armazenamento e a movimentação das águas nos aquíferos como consequência dos parâmetros hidrodinâmicos característicos, o que já não corresponde ou não é característico dos aquíferos cársticos-fissurais (**Figura 3.1**). O fenômeno cárstico é o conjunto de transformações que ocorrem em uma região de rochas carbonáticas como consequência da circulação da água. Estas transformações são o que distingue o meio cárstico dos demais meios aquíferos e é o resultado da procura natural do equilíbrio químico entre a água e as rochas carbonáticas. Neste processo de transformação a água é o elemento ativo transitório e a rocha carbonáticas o passivo permanente. Quando cessa a atividade da água os fenômenos cársticos deixam de ocorrer e as rochas carbonáticas permanecem passivas e sujeitas a novas ações do elemento água. A ocorrência do fenômeno cárstico está condicionada a circulação e a atividade da água que por sua vez é sujeita a fatores geológicos, geográficas e climáticas. Estes fatores são variáveis ou cíclicos, o que provoca uma intermitência na circulação hídrica através das rochas e consequentemente uma ação descontínua nas transformações do meio cárstico (SILVA, A. B. 1995). Desta maneira poderá haver feições cársticas desenvolvidas em distintos períodos geológico-climáticos, em função da própria evolução da geomorfologia cárstica.

Características físicas e hidrogeológicas do Aquífero Cárstico

O aquífero cárstico, bem como o sistema cárstico possui características físicas e hidrodinâmicas bem singulares, de acordo com Manoel Filho (2000) destacam-se:

- A presença de extensas zonas sem correntes de águas superficiais, inclusive em climas úmidos;
- A ocorrência de depressões, mais ou menos grandes, cuja drenagem é subterrânea;
- A existência de cavidades no subsolo (galerias ou cavernas) pelas quais circulam correntes de águas subterrâneas;
- Pequeno valor de escoamento superficial;
- Complexa circulação de águas subterrâneas tanto nas zonas saturadas como acima da superfície potenciométrica do aquífero;
- Normalmente a existência de zonas desnudas, sem vegetação.

Reforçando a ideia das influências geológicas, estratigráficas e estrutural a CPRM (2000) e outros estudos citam alguns fatores importantes para a variabilidade do carste:

- A heterogeneidade da textura normalmente encontrada nas diversas camadas de rochas carbonáticas;
- As alternâncias destas camadas com outras não cársticas, permeáveis ou não;
- A anisotropia da fissuração das rochas, com a presença de fraturas, falhas e outras estruturas de quebramento;
- As fases de carstificação pretéritas à etapa recente do atual desenvolvimento geomorfológico.

Além desses pontos citados, é importante frisar que a movimentação e a direção do movimento das águas subterrâneas no meio cárstico dependem muito das estruturas tectônicas e do processo de carstificação ou esculturação do aquífero.

As características mencionadas fazem com que o estudo sobre aquífero cárstico ganhe atenção especial, pois são esses aspectos que influenciam diretamente na movimentação e no armazenamento de águas subterrâneas. Quanto a isso é importante mencionar suas características hidrodinâmicas e quais peculiaridades podem ser geradas:

- O aquífero cárstico geralmente possui recarga direta;
- É anisotrópico (condutividade hidráulica é diferente para cada um dos eixos coordenados) e heterogêneo (existência de materiais de condutividade diferente, dessa forma a condutividade pode variar com a posição) (**Figura 3.2**);
- Descontínuo (armazenamento de água subterrânea em condutos, fraturas e falhas, que podem ter conexão ou não).
- Grande rapidez da infiltração das chuvas e outras águas superficiais;
- Anomalias na direção do fluxo de água com relação ao gradiente potenciométrico regional;
- Grande diferença entre a média e a mediana da distribuição estatística dos valores de permeabilidade em um mesmo aquífero cárstico;
- Muita variação de um lugar para outro dos valores do coeficiente de armazenamento e da transmissividade de um aquífero cárstico.

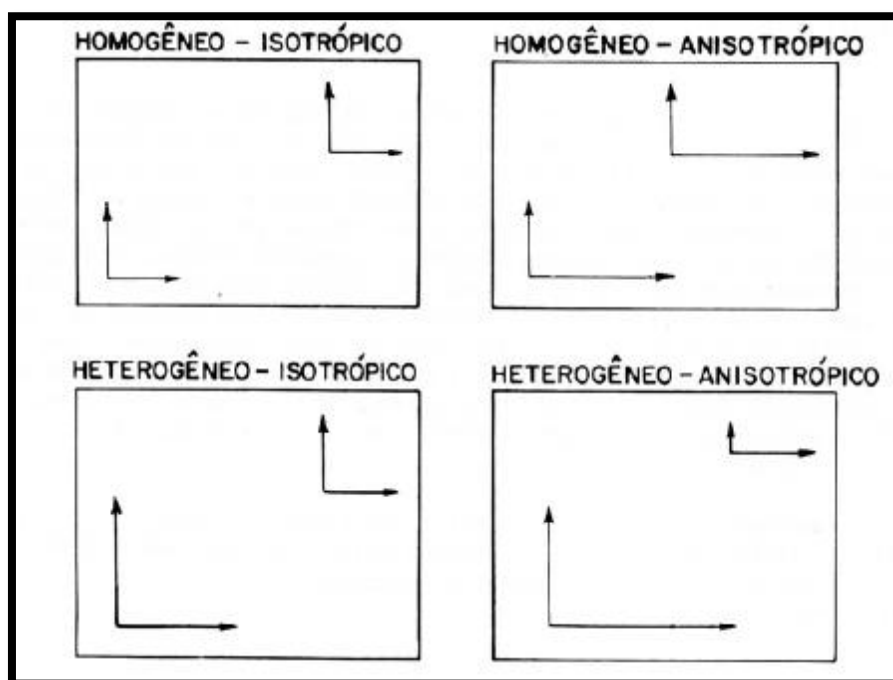


Figura 3.2: Ilustração das diferenças de características hidráulicas dos diferentes tipos de aquíferos. Modificado de Freeze e Cherry (1979).

Hidroquímica dos aquíferos cársticos

De modo geral, o componente principal dos calcários é o carbonato de cálcio, cujo mineral é a calcita. Subsidiariamente ocorrem os carbonatos de magnésio, sílica, óxido de ferro e manganês, álcalis e outros elementos menores. Além da calcita, os principais componentes das rochas carbonáticas são: dolomita, siderita, magnesita, ankerita e argila.

A água subterrânea nos aquíferos cársticos com as características do Aquífero Jandaíra sofrem forte influência das reações descritas anteriormente, desta forma, é fácil imaginar que essas águas contenham grande percentual de íons derivados da dissolução de rochas carbonáticas. Os íons mais frequentes nesse tipo de aquífero são: Ca^{+2} ; Na^{+} ; Mg^{+2} ; K^{+} ; Cl^{-} ; HCO_3^{-} ; SO_4^{-} ; NO_3^{-} ; Entre os cátions, o Ca^{+2} é o mais abundante, seguido do Mg^{+2} ; entre os ânions, o bicabornato (HCO^{-}) predomina, seguido do Cl^{-} .

As águas nos aquíferos cársticos geralmente possuem condutividade elétrica alta (média de 240 mS/cm). Dependendo da movimentação das águas subterrâneas, a influência das rochas carbonáticas sugere a existência de águas duras e salinidade possivelmente elevada.

Para o aquífero Jandaíra em específico, a SEMARH (2014) caracterizou as águas subterrâneas de acordo com diagrama de Piper (**Figura 3.3**).

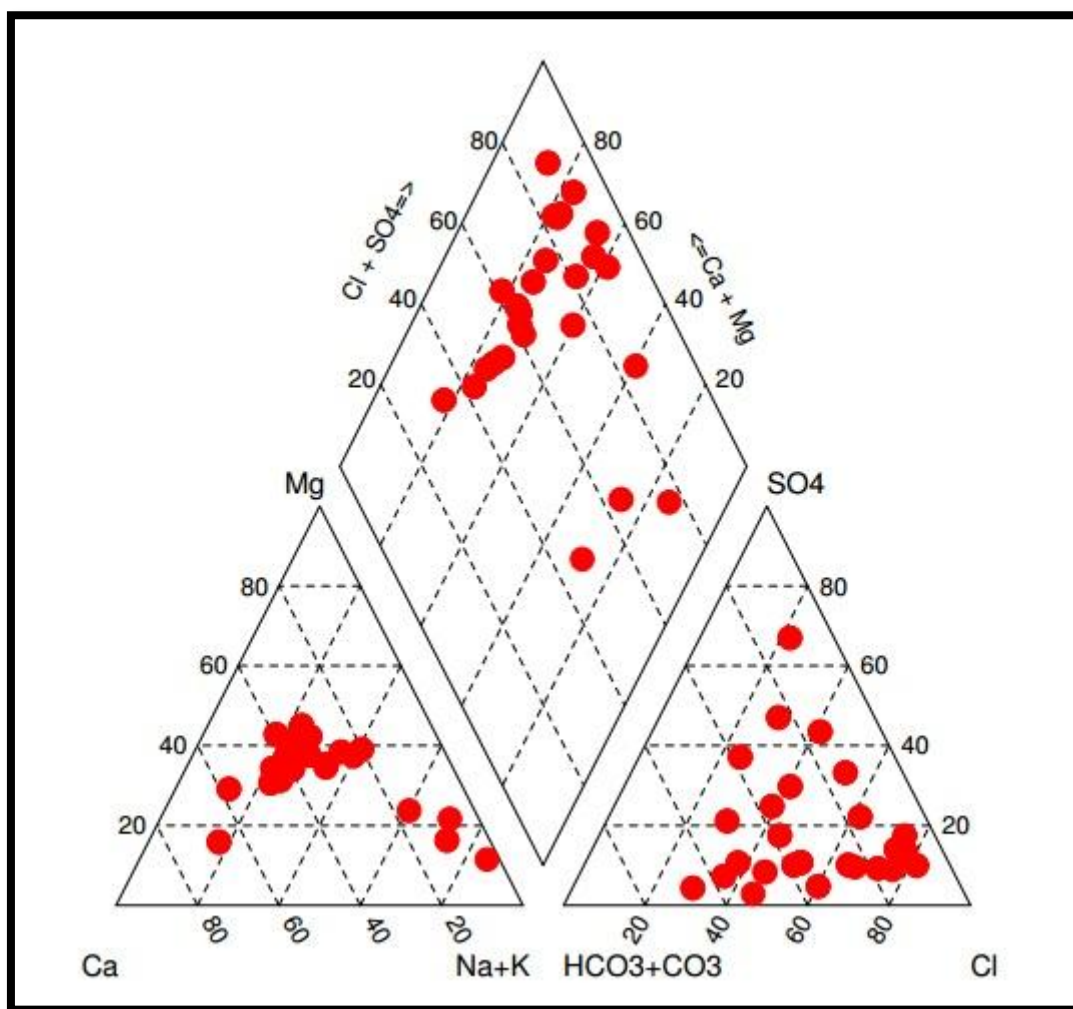


Figura 3.3: Diagrama trilinear de Piper das águas no aquífero Jandaíra – RN. SEMARH (2014).

Para a interpretação dos dados quanto aos tipos iônicos foi utilizado o diagrama hidroquímico de Piper (Piper, 1944; Hem, 1985), no qual foram plotadas as concentrações dos íons principais nas águas subterrâneas: Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- e SO_4^{2-} e expressos em miliequivalentes por litro (meq L⁻¹). Esse diagrama permite caracterizar as águas subterrâneas quanto aos íons dominantes.

Conforme os dados plotados no referido diagrama, para as águas de subterrâneas dos poços do aquífero Jandaíra predominam águas cloretadas bicarbonatadas cálcicas, seguidas de águas cloretadas cálcicas. Os teores de HCO_3^- e Ca^{2+} observadas nessas águas demonstram processos naturais de interação água-rocha em domínio carbonático. Os teores de Cl^- observados nessas águas demonstram influência climática no semiárido na região, de acordo com Hem (1985).

CAPÍTULO 4 – Balanço Hídrico e Caracterização Climática

4 – BALANÇO HÍDRICO E CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA

O balanço hídrico e a caracterização climática da região de Baraúna e Mossoró foram efetuados com base em dados da estação meteorológica de Aracati-CE, Mossoró-RN e Jaguaruana-CE, obtidos através do Banco de Dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), período de 1974 a 2008 (35 anos), além de informações da área de estudo no contexto regional. Os parâmetros fundamentais nessas avaliações são as precipitações (P) mensais anuais e as evapotranspirações potenciais correspondentes.

Precipitações pluviométricas

As precipitações pluviométricas anuais nas estações de Aracati-CE, Mossoró-RN e Jaguaruana – CE são de 934,8 mm; 771,3 mm e 744,2 mm, respectivamente, com média de 816,9 mm (**Tabela 4.1**). O comportamento observado quanto a distribuição das chuvas ao longo dos meses é similar (**Figura 4.1**), verificando-se que as mesmas ocorrem nos meses de janeiro a junho com maior concentração nos meses de março e abril, neste caso, alcançando valores em torno de 200 mm.

Tabela 4.1: Valores Médios Mensais de Precipitação na região de Baraúna e Mossoró (Período de 1974 a 2008). Fonte: INMET, 2009.

Meses	Mossoró/RN	Aracati/CE	Jaguaruana/CE	média
Jan	82,9	98,4	61,3	80,9
Fev	113,9	147,3	110,8	124,0
Mar	177,9	235,2	202,5	205,2
Abr	179,1	217,1	180,1	192,1
Mai	99,2	124,5	99,3	107,8
Jun	52,1	49,7	48,1	50,0
Jul	36,3	28,5	22,2	29,0
Ago	7	6,1	3,9	5,7
Set	4,4	2,3	2,9	3,2
Out	2,1	3,6	2,5	2,7
Nov	2,9	2,9	0,6	2,1
Dez	13,5	19,1	9,9	14,2
Ano	771,3	934,8	744,2	816,9

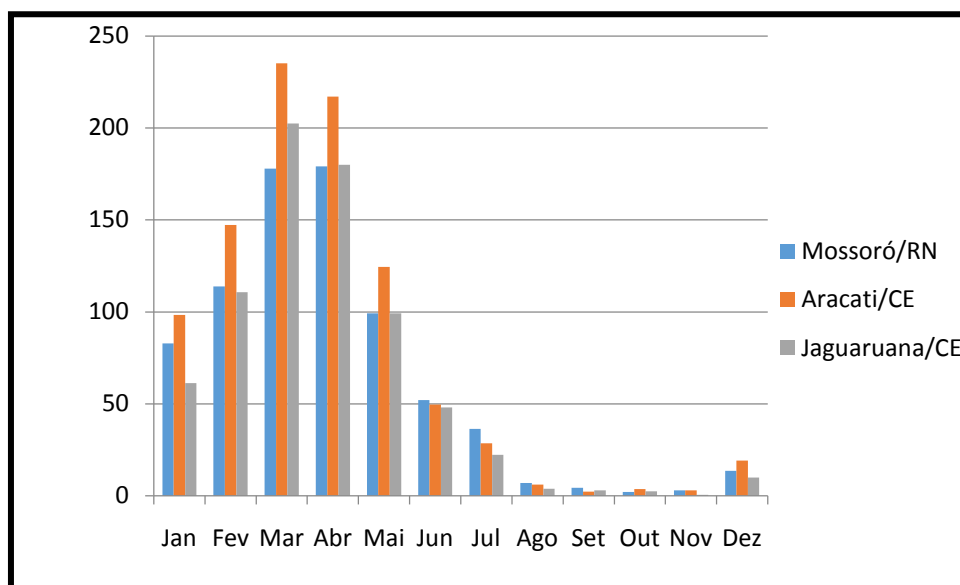


Figura 4.1: Gráfico da Precipitação Média Mensal (mm). Fonte: INMET, 2009.

Parâmetros que influem nos componentes primários do ciclo hidrológico

Os componentes primários do ciclo hidrológico correspondem a precipitação, evapotranspiração, escoamento superficial ou runoff e infiltração. Influem sobre esses componentes, principalmente sobre a evapotranspiração, os seguintes elementos: temperatura, radiação, insolação, umidade relativa, ventos e pressão atmosférica. Para avaliação da evapotranspiração potencial ETp é necessário conhecer as coordenadas do lugar, o índice global da radiação ($\text{cal}/\text{cm}^2/\text{dia}$) ou a insolação, a umidade relativa do ar e as temperaturas mensais anuais. As três primeiras informações foram obtidas de mapas e atlas climatológicos regionais, enquanto que no caso das temperaturas foram utilizados os dados da Estação de Mossoró (**Tabela 4.2**).

A temperatura média varia anualmente ao longo dos meses com uma amplitude de 2,6 °C, indo de 26,1°C nos meses mais frios (junho e julho) a 28,7 °C no período mais quente (outubro a janeiro), **Figura 4.2A**. A evaporação é menor no período de fevereiro a junho, intensificando-se a partir de julho, até atingir o valor máximo no mês de outubro, quando diminui gradativamente (**Figura 4.2B**). O período de insolação não sofre grandes modificações, com limites mínimos de fevereiro a abril (em torno de 200 h/mensais) e máximos de agosto a novembro (pouco menos que 300 h/mensais), **Figura 4.2C**. A umidade relativa do ar varia de 60,7 a 80,7%. A umidade é mais elevada nos meses de março e abril, que corresponde ao período de maiores precipitações pluviométrico (**Figura 4.2D**). A

velocidade do vento atinge um valor mínimo de 2,1 no mês de abril e máximo de 5,0 m/s no mês de outubro (**Figura 4.2E**).

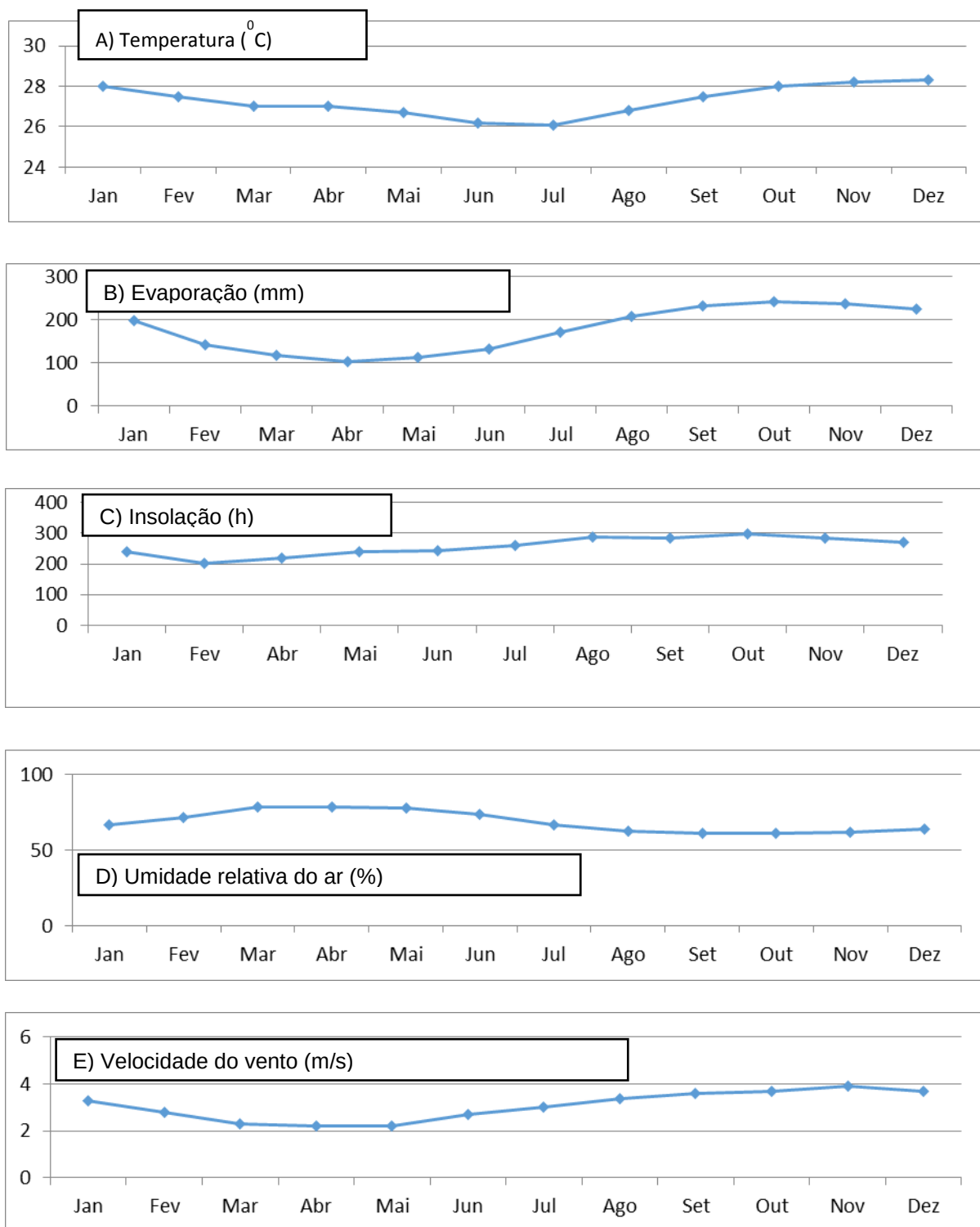


Figura 4.2: Fatores que influenciam nos componentes primários do ciclo hidrológico. Gráficos obtidos com dados da Estação meteorológica de Mossoró-RN.

Tabela 4.2 Valores médios mensais dos elementos climáticos na estação de Mossoró/RN (Período de 1974 a 2008). Fonte: INMET, 2009.

Elementos do clima		Médias Mensais												Média ou
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total Anual
Precipitação	média	82,9	113,9	177,9	179,1	99,2	52,1	36,3	7	4,4	2,1	2,9	13,5	771,3
T (°C)	Mínima	23,9	23,6	23,3	23,2	22,9	21,9	21,4	21,5	22,2	23,2	23,4	23,7	22,9
	Máxima	34,1	33,6	32,9	32,6	32,5	32,4	32,8	34,1	34,8	34,9	34,8	34,7	33,7
	Média	28,3	27,9	27,4	27,1	27	26,6	26,7	27,3	28	28,3	28,5	28,7	28,3
Evaporação (mm)		198,1	143,7	119,1	104,1	113,7	132	171,7	208	231,7	243	237,2	226,2	198,1
Insolação (horas)		232,7	198,9	207,7	198,8	223,7	212,5	236,1	271,6	278,2	296,2	287,4	268,6	232,7
Umidade	relativa	70,6	73,1	79,2	80,7	78,2	73,6	68,8	62,3	60,7	62,2	64,4	65,6	70,6
Ventos	Velocidade	4	3,3	2,8	2,1	2,3	2,7	3	4,2	4,8	5	4,9	4,6	4
	Direção	NE	NE	Calmo	Calmo	Calmo	SE	SE	SE	SE	NE	NE	NE	-

Balanço Hídrico na Região de Baraúna

Para o estabelecimento do Balanço hídrico é necessário os dados de precipitação pluviométrica P mensais anuais e das evapotranspirações potenciais ET_p correspondentes. Os valores de ET_p foram obtidos a partir de dados de temperatura da estação meteorológica de Mossoró, que reconhecidamente apresenta maior condição de aridez com relação a área de estudo. Com relação as precipitações para efeito de caracterização da área foram utilizados os valores médios de precipitação pluviométrica obtidos dos postos de Aracati-CE, Jaguaruana-CE e Mossoró-RN, que resultou em um valor superior àquele informado para a estação de Mossoró.

Calculo de ET_p

A umidade relativa do ar $U_r > 50\%$, assim sendo para o calculo da ET_p mensal utiliza-se a equação:

$$ET_p = 0,40(I_g + 50)\left(\frac{t}{t + 15}\right)$$

Para o mês de fevereiro

$$ET_p = 0,37(I_g + 50)\left(\frac{t}{t + 15}\right)$$

Onde:

ET_p é evapotranspiração potencial (mm/mês)

t é temperatura média mensal do período em °C

I_g é índice global de radiação ($\text{cal}/\text{cm}^2/\text{dia}$)

Os valores de I_g (**Tabela 4.3**) foram obtidos a partir dos mapas de Black fornecidos mensalmente.

A ET_p mensal variou de 103,0 mm a 148,4 mm/mês com um total anual de 1493,1 mm.

Tabela 4.3 Valores obtidos da Evapotranspiração potencial ETP.

Mês	t (°C)	Ig (cal/cm ² /dia)	Etp (mm)
Jan	28,3	400	117,6
Fev	27,9	380	103,4
Mar	27,4	400	116,3
Abr	27,1	350	103,0
Mai	27,0	380	110,6
Jun	26,2	390	112,0
Jul	26,1	500	139,7
Ago	26,8	460	130,8
Set	27,5	520	147,5
Out	28,0	520	148,4
Nov	28,2	460	133,1
Dez	28,3	450	130,7
Total Anual			1493,1

Resultados do balanço hídrico e Interpretação

A evapotranspiração potencial anual obtida conforme já apresentado é da ordem de 1493,1 mm e a evapotranspiração real obtida pelo Balanço hídrico (**Tabela 4.4**) foi de 718,3 mm/ano, portanto um *déficit* hídrico de 774,8 mm/ano. O período de *déficit* é de Julho a janeiro (**Figura 4.3**). Ocorre excedente hídrico nos meses de março e abril, com um total anual de 98,6 mm.

O balanço está representado (**Figura 4.3**) a partir do momento em que as reservas de água no solo começaram a se reconstituir, mês de fevereiro, que corresponde ao mês no qual foi iniciado o balanço.

O excedente hídrico representa o volume de água que se infiltra no terreno e que escoia sobre sua superfície. As características morfológicas da área de estudo com relevo plano, ausência de drenos superficiais e constituição do terreno predominantemente arenoso, sugerem praticamente a ausência de escoamentos superficiais. Neste caso, o excedente hídrico obtido é uma indicação em potencial do volume de água infiltrado no terreno. Portanto, tomando por base o excedente hídrico de 98,6 mm e a precipitação média anual de 816,9 mm, resulta em uma taxa de infiltração em potencial de 12%, o que é mais característico de regiões semi-áridas a sub-úmidas.

Tabela 4.4 Resultados do Balanço hídrico da Região de Baraúna (valores em mm).

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ano
Evapotranspiração potencial ETP	117,6	103,4	116,3	103,0	110,6	112,0	139,7	130,8	147,5	148,4	133,1	130,7	1493,1
Precipitação P	80,9	124,0	205,2	192,1	107,8	50,0	29,0	5,7	3,2	2,7	2,1	14,2	816,9
Diferença P - Etp	-36,7	20,6	88,9	89,1	-2,8	-62,0	-110,7	-125,1	-144,3	-145,7	-131,0	-116,5	
Variação da reserva d'água do solo	0	20,6	79,4	0	-2,8	-62	-35,2	0	0	0	0	0	0
Reserva d'água útil (100 mm)	0	20,6	100	100	97,2	35,2	0	0	0	0	0	0	0
Evapotranspiração real Etr	80,9	103,4	116,3	103,0	110,6	112,0	64,2	5,7	3,2	2,7	2,1	14,2	718,3
Déficit D	36,7	0	0	0	0	0	75,5	125,1	144,3	145,7	131,0	116,5	774,8
Excedente S	0	0	9,5	89,1	0	0	0	0	0	0	0	0	98,6
Escoamento R	0	0	4	46	23	11	5	2	1	0	0	0	0

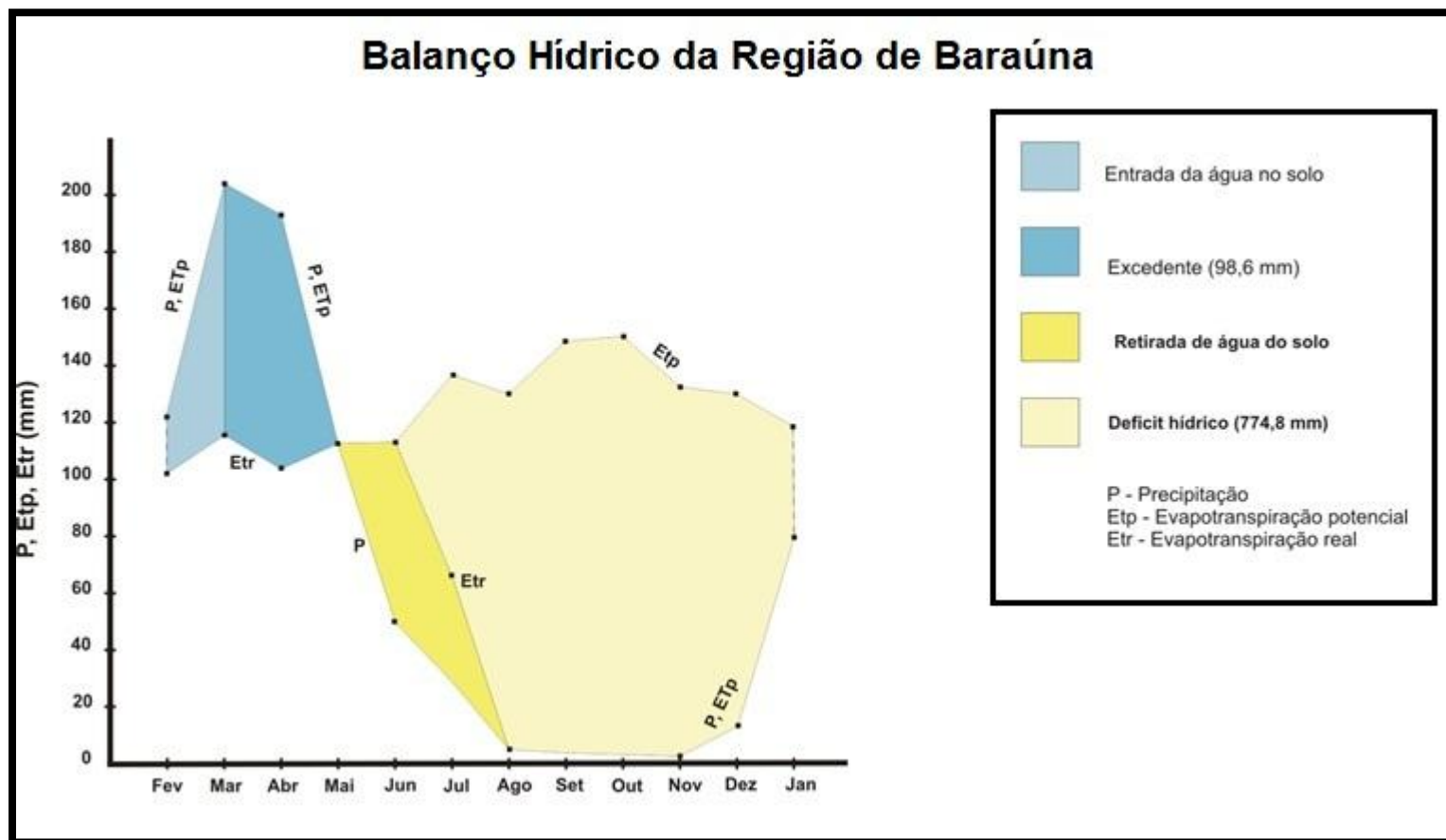


Figura 4.3: Balanço hídrico na região de Baraúna-RN.

Caracterização do clima

O tipo de clima pode ser definido segundo Thornthwaite em função do índice global i expresso pela seguinte equação:

$$i = i_h - 0,6i_a$$

Onde:

i_h é o índice de umidade definido por $i_h = \frac{S}{ET_p} \cdot 100$.

i_a é o índice de aridez definido por $i_a = \frac{D}{ET_p} \cdot 100$

S é o excedente hídrico anual avaliado em 98,6 mm; D é o *déficit* hídrico anual de 774,8 mm e ET_p é a evapotranspiração potencial anual avaliada em 1493,1mm.

Aplicando as equações resulta: $i_h = 6\%$; $i_a = 52\%$ e $i = -25\%$.

Com esses resultados, o clima da área de estudo fica caracterizada como semi-árido, porém próximo da faixa para um clima sub-úmido (**Tabela 4.5**).

Tabela 4.5: Tipo de clima, segundo o valor do índice global anual (i).

Índice global (i)	Tipo de clima
$i > 100$	Muito úmido
20 a 100	Úmido
0 a 20	Sub-úmido/ úmido
-20 a 0	Sub-úmido a seco
-40 a -20	Semi-árido
-60 a -40	Árido
< -60	Hiper-árido

CAPÍTULO 5 – Hidrogeologia do Aquífero Cárstico Jandaíra

5 – HIDROGEOLOGIA DO AQUÍFERO CÁRSTICO JANDAÍRA

5.1 – CONTEXTO DA HIDROGEOLOGIA REGIONAL

De acordo com o Plano Estadual de Recursos Hídricos - SERHID (1998a), os recursos hídricos subterrâneos do RN, estão contidos em cinco aquíferos principais: Cristalino; Aquífero Açú; Aquífero Jandaíra; Aquífero Barreiras e Depósitos aluviais, descritos a seguir e visualizados na **figura 5.1**:

Entre os aquíferos mencionados, o maior deles é o **Cristalino** (fissural), que ocupa uma área de 51.809 km², equivalente a cerca de 60% da superfície total do Estado. Apresenta poços com profundidade média de 50 metros e vazão média da ordem de 1,5 m³ h⁻¹ (SERHID, 1998a).

O **aquífero Açú** atinge uma espessura de 400 m, constituído por arenitos médios a conglomeráticos na base, passando a arenitos médios na porção intermediária e arenitos mais finos no topo. Atinge uma área total de cerca de 22.000 km², esse aquífero ocorre na Bacia Potiguar capeado pelo calcário Jandaíra, onde se apresenta confinado (SERHID, 1998b). Os poços tubulares nesse aquífero poroso apresentam vazões que podem alcançar os 200 m³ h⁻¹ produzindo águas de boa qualidade e baixa concentração iônica. Nessa bacia, o Aquífero Açú aflora, ao longo de uma faixa marginal ao sul com largura variando entre 5 km, no extremo leste, e 20 km, no extremo oeste, as melhores possibilidades hidrogeológicas e baixa concentração iônica da água subterrânea estão localizadas no setor norte da faixa (Stein e Melo, 2006).

O **aquífero Jandaíra** ocorre numa superfície total de 17.756 km² e é constituído de calcários cinzas, cremes, margas, siltitos, argilitos e dolomitos cremes. Esta área de ocorrência inclui as zonas recobertas pela Formação Barreiras, aluviões e dunas, que totalizam cerca de 5.980 km². Estudos regionais indicam que a espessura da Formação Jandaíra pode chegar a 600 m na porção mais profunda da Bacia Potiguar, embora as espessuras mais importantes, do ponto de vista hidrogeológico, tenham sido registradas entre 50 e 150 m com vazões variando entre 10 a 50 m³ h⁻¹, conforme Mistreta (1984). As águas do Jandaíra apresentam dureza superior a 200 mg L⁻¹ como CaCO₃ e, sólidos totais dissolvidos entre 1.000 a 5.000 mg L⁻¹ (SERHID, 1998b).

O **aquífero Barreiras** ocorre ao longo de todo o litoral do Rio Grande do Norte, a largura oscila entre 10 e 40 km, recobrimdo calcários da Formação Jandaíra e as rochas cristalinas. É constituído por rochas argilo-arenosas ou areno-argilosas até conglomeráticas, com duas fácies sedimentares principais: uma areno-argilosa e outra conglomerática, situadas respectivamente, na porção basal e no topo. As melhores vazões desenvolvidas ocorrem na faixa leste do RN, no trecho entre Touros e a fronteira com a Paraíba, podendo atingir até 200 m³ h⁻¹ com águas de excelente qualidade (SEMARH, 2014). Porém, de acordo com Melo *et al.* (1995), alguns bairros de Natal e região metropolitana apresentam águas com elevada concentração de nitrato (NO³).

Nos **depósitos aluviais**, é possível distinguir duas origens: (a) aluviões que ocorrem nos terrenos do embasamento cristalino; e, (b) aqueles que são gerados nas áreas sedimentares. Os primeiros exibem geralmente pequenas espessuras, oscilando entre 3 e 6 m com vazões médias entre 2 a 5 m³ h⁻¹, e normalmente suas águas são salobras. Os aluviões das regiões sedimentares apresentam maiores espessuras, chegando até a 30 m, as vazões variam normalmente entre 10 a 100 m³ h⁻¹ e a salinidade normalmente entre 200 a 1.000 mg L⁻¹ de resíduo seco (SEMARH, 2014).

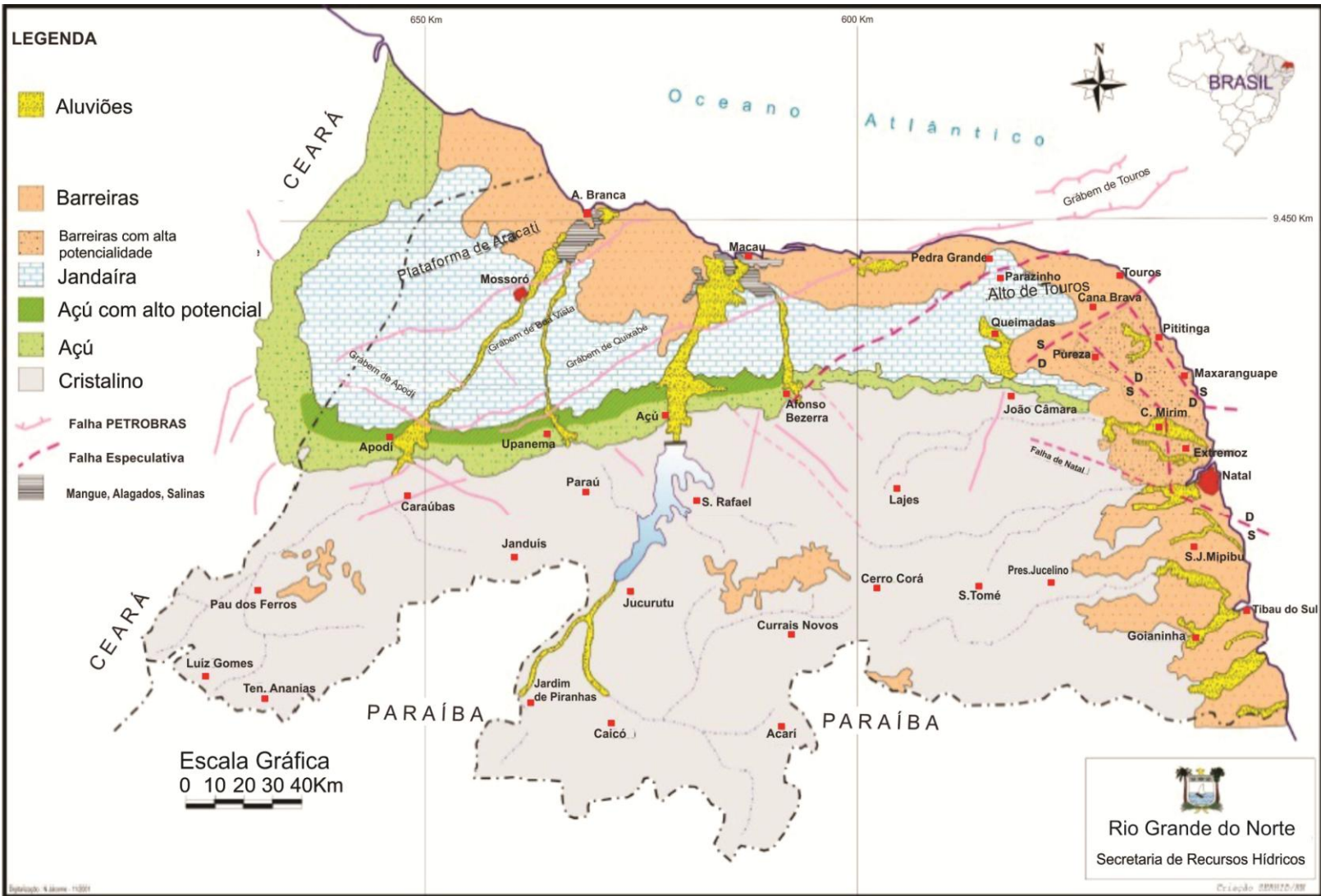


Figura 5.1: Mapa de aquíferos do Rio Grande do Norte. Modificado de SEMARH, 2014.

5.2 – COMPORTAMENTO OBSERVADO NA REGIÃO DE BARAÚNA

5.2.1 – Trabalhos Realizados

Para execução do trabalho foi tomado como base, estudos já executados na região de Baraúna, entre eles, destacam-se:

O trabalho de Gestão Compartilhada de Águas Subterrâneas na Chapada do Apodi, Entre os Estados do Ceará e Rio Grande do Norte, executado pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2010). Trata-se de um estudo a respeito da hidrogeologia da região, mostrando indicadores importantes, englobando reservas, demandas, qualidade de águas, fluxos, vulnerabilidade, uso e ocupação da terra e rede monitoramento de águas subterrâneas. Foi elaborado como uma primeira proposta para a gestão compartilhada de águas subterrâneas em aquíferos interestaduais, nesse caso, Rio Grande do Norte e Ceará abrangendo, inclusive, a área de interesse deste trabalho.

A compilação de dados na região resultou em uma caracterização hidrogeológica e hidrogeoquímica completa, com elaboração de mapas potenciométricos que mostraram uma tendência regional de fluxo subterrâneo SW-NE; o balanço hídrico foi elaborado na região das três bacias que dominam a área da divisa CE-RN; execução de testes de aquíferos (Resultados de vazão de poços e evolução dos níveis de água); elaboração de modelos conceituais; avaliação de recarga [Avaliação elaborada em três metodologias distintas (Estimativa da recarga a partir de dados hidrológicos; Estimativa da recarga a partir de ensaios de infiltração e Estimativa da recarga com base na variação do nível potenciométrico) e em três setores distintos, denominados A1 (Bacia do Jaguaribe); A2 (Bacia do Riacho de Mata Fresca) e A3 (Bacia do Apodi)], essa avaliação produziu números importantes para o entendimento hidrogeológico da região, levando ao conhecimento uma variação pluviométrica entre 690 e 340 mm/ano, excedente hídrico variando entre 150 a 400 mm/ano, os resultados para a recarga média mostraram grande distinção pela área variando de 85 a 350 mm/ano com um escoamento superficial médio de 120 mm; e avaliação de reservas (para o Rio Grande do Norte, especialmente a bacia do Riacho de Mata Fresca, localizada em Baraúna, chegou-se a resultados como: 270 Hm³/ano ou 8,570 m³/s para reservas reguladoras, 13362 Hm³/ano ou 1,34x10¹⁰ m³ para reservas permanentes e 270 Hm³ ou 8,570 m³ para reservas explotáveis).

Outro trabalho importante na região assinala-se a dissertação de mestrado elaborada por Medeiros, A. B. (2006) que tem por título Avaliação Hidrogeoquímica e Qualidade das Águas para Irrigação no Município de Baraúna-RN, que consistiu na avaliação das águas subterrâneas do aquífero Jandaíra na região de Baraúnas com o propósito de discutir as modificações hidrogeoquímicas que correm nas águas subterrâneas e apresentação da classificação das águas para irrigação, associando aos seus devidos contextos. O trabalho se baseou em análises químicas e dados de estudos geofísicos de resistividade elétrica, que gerou um mapa de zoneamento de resistividade (**Figura 2.3**) e testes de bombeamento, como também, observações topográficas que permitiram a elaboração de um mapa de fluxo subterrâneo (**Figura 5.9**).

Mais localmente, precisamente no setor sudoeste da área de interesse, foram produzidos estudos importantes no acréscimo de informações sobre a hidrogeologia da região de Baraúna, que é o caso do estudo “Análise dos Impactos do Rebaixamento do nível das Águas Subterrâneas do Aquífero Jandaíra na Área da Mina da Fábrica de Cimento Mizu, situada no Setor Oeste do Município de Baraúna” (Melo, et al, 2014), com participação de pesquisadores da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN e Universidade Federal de Pernambuco - UFPE. O objetivo principal deste trabalho, foi a execução de estudos hidrogeológicos, hidroquímicos e ambientais voltados para a avaliação dos impactos do desaguamento da mina Mizu nas águas subterrâneas da área da mineração e no seu entorno, bem como a elaboração de um modelo matemático de simulação dos abaixamentos dos níveis d’água subterrânea tendo em vista o referido desaguamento, através da captação d’água em poços. Este estudo mostrou informações importantes para uma área menos abrangente de Baraúna, porém muito importante para o entendimento da hidrogeologia da região, como mapas geológicos e estruturais, ensaios de bombeamento, potenciometria, hidrogeoquímica das águas e modelo hidrogeológico, dados e conceitos que serão comentados e utilizados para explicar e elaborar resultados para este trabalho.

5.2.2 – Uso das Águas

De acordo com a SERHID (2006), na região da área de estudo, o número de poços cadastrados na época de realização do trabalho já passava de 600 unidades (**Figura 5.2**), com utilização de águas subterrâneas do Aquífero Jandaíra na irrigação, consumo humano e consumo animal cuja distribuição é mostrada nas **tabelas 5.1 e 5.2**. Esse número tem

aumentado nos últimos anos à taxas elevadas, como também tem aumentado as vazões de exploração dessas unidades, com poços produzindo até 200 m³/h.

As profundidades dos poços variam de 60 a 120 m, com a ocorrência de poços secos a poços produzindo até 200 m³/h. Os níveis estáticos dos poços variam de 15 a 50 m e são produzidos rebaixamentos que geram níveis dinâmicos de 16 a 70 m (Medeiros, 2006).

O uso das águas do aquífero Jandaíra, atualmente, é bastante direcionado à agricultura irrigada. Anos atrás se dividia em utilização doméstica por parte da população, pecuária, carnicultura e agricultura, no entanto, as proporções se afunilaram devido ao crescimento da fruticultura irrigada. Atualmente funcionam diversos projetos que utilizam as águas subterrâneas, na irrigação.

FEITOSA (1994) já atentava para o crescimento da atividade agrícola na região: “Os calcários da Formação Jandaíra na região de Baraúna tem se revelado em geral como um bom condutor hidráulico, decorrente do elevado nível de carstificação, o que lhes atribui o caráter de um aquífero com elevado potencial e água de qualidade adequada ao desenvolvimento da fruticultura irrigada”.

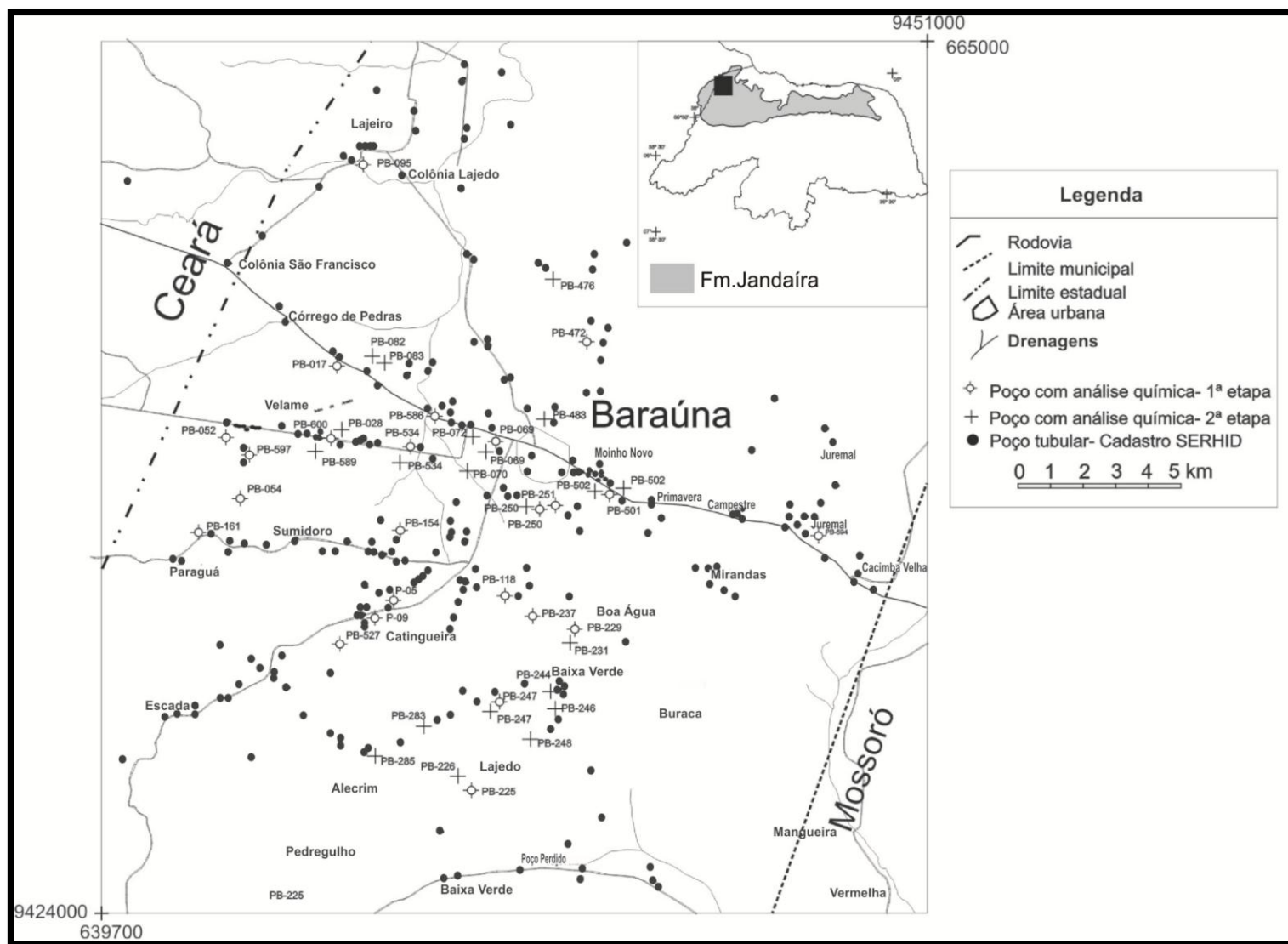


Figura 5.2: Situação da área de estudo e poços cadastrados. Fonte: Medeiros, 2006.

De acordo com a ANA (2010), na região entre Baraúna-RN e Quixeré-CE, para fins comparativos, a distribuição dos poços cadastrados quanto à propriedade do terreno e quanto à situação operacional, nos anos de 2002 e 2009, inclusive no Aquífero Jandaíra, são mostradas na **tabela 5.1**. Observa-se que, em 7 (sete) anos, houve um aumento de 70% no número de poços existentes, que passou de 846 para 1440. Aumento ainda mais significativo (cerca de 88%) ocorreu na participação do setor privado na propriedade dos poços, que passou de 634 em 2002 para 1195 em 2009.

A exploração de água subterrânea na área de estudo da ANA (2010) registrou um acréscimo de 7% no número de poços em operação, cujo percentual passou de 56% em 2002 (473 poços) para 63% em 2009 (908 poços). Ao mesmo tempo ocorreu uma redução no percentual de poços abandonados ou desativados, que passou de 16% para 11%.

Ainda de acordo com ANA (2010), na região entre os municípios de Baraúna e Quixeré, o maior usuário das águas subterrâneas do Jandaíra é a Empresa Del Mont que dispõe de 44 poços com capacidade instalada de 4720 m³/h e vazão média por poço, de 107 m³/h, usado na fruticultura irrigada. Além da Del Mont, exercem essa mesma atividade 14 (quatorze) outros usuários. Em conjunto os 15 usuários de água subterrânea para a irrigação de frutas tropicais, utilizam 162 poços com uma produção horária de 12113 m³. Os 4 (quatro) usuários restantes utilizam 57 poços com uma produção total de 3870 m³/h (22%) usada na carcinicultura como mostra a **tabela 5.2**. Os 19 usuários do aquífero Jandaíra captam uma descarga total de 4,44 m³/s, 1,08 m³/s de 57 poços para uso na carcinicultura e 3.36 m³/s de 162 poços para uso na fruticultura irrigada. No município de Baraúna, 100% (396) dos pedidos de outorga são para água subterrânea, sendo 99% (392) para irrigação e apenas 1% (4) para consumo animal.

Tabela 5.1: Distribuição global e para o aquífero Jandaíra dos poços cadastrados quanto à propriedade do terreno em setembro de 2002 e em setembro de 2009 na região entre Baraúna e Quixeré. Fonte: ANA, 2010.

Poços Existentes				Operação	Não Instalados	Paralisados	Abandonados ou desativados
Ano	% Públicos	% Privados	Na área	%	%	%	%
Set/02	25	75	846	56	11	17	16
Set/09	16	84	1440	67	10	12	11
Aquífero Jandaíra (2009)	25% (350)	75 % (1048)	100% (1398)	56% (783)	11% (154)	17 % (237)	16% (224)

Tabela 5.2: Relação dos principais usuários de águas subterrânea do aquífero Jandaíra na região entre Baraúna-RN e Quixeré-CE.

Ordem	Nome	Vazão (m ³ /h)	Número de poços	Média por poço (m ³ /h)	Uso
1	DEL MONT	4720	44	107	Fruticultura irrigada
2	Faz. Mossoró	1440	24	60	Carnicicultura
3	Aquarium Aquicultura do Brasil LTDA	910	10	91	Carnicicultura
4	Hidrotec Marine	790	13	61	Carnicicultura
5	Fazenda Fruta Cor - João Texeira JR	780	4	195	Fruticultura irrigada
6	Wildemar Vieira	730	10	73	Carnicicultura
7	PH Prod. E Dist. de Frutas LTDA	690	13	53	Fruticultura irrigada
8	Ivanildo P. Figueiredo	685	12	57	Fruticultura irrigada
9	JS Sallouti	614	16	38	Fruticultura irrigada
10	Odilon Xavier Batista	580	8	73	Fruticultura irrigada
11	Airlon Gonçalves de Souza	540	5	108	Fruticultura irrigada
12	Antônio Solon Nunes	480	6	80	Fruticultura irrigada
13	Aldivan Isoares	470	13	36	Fruticultura irrigada
14	Carlos Matsumoto	464	18	26	Fruticultura irrigada
15	Alberto Fernandes Farias	450	5	90	Fruticultura irrigada
16	Evandro Mendes	440	5	88	Fruticultura irrigada
17	Antonio Avelino de Moraes	400	4	100	Fruticultura irrigada
18	José Ricardo C. de Medeiros	400	4	100	Fruticultura irrigada
19	Faz. Agrícola Famosa	400	5	80	Fruticultura irrigada
	TOTAL	15873	219	80	

5.2.3 – Parâmetros Hidrodinâmicos

Os Parâmetros hidrodinâmicos do aquífero Jandaíra, na região de Baraúna foram obtidos em diversos pontos, com uma dispersão nos valores significativa, embora o coeficiente de variação de 0,53 (razão do desvio padrão de 438,7 contra a média de 822,9) não pareça muito alto.

A vazão média informada para a região entre Baraúna-RN e Quixeré-CE é de 822,9 m³/dia, variando no intervalo de 24 m³/dia (1 m³/h) a 4180 m³/dia, (174 m³/h). O intervalo de

confiança de 95% da média fica aproximadamente entre 800 m³/dia e 850 m³/dia (ANA, 2010).

Outros dados de parâmetros hidrodinâmicos do aquífero Jandaíra foram avaliados através de um teste de aquífero realizado no Sítio Furna de Pedra, 6 km ao norte da cidade de Baraúna (ANA, 2010). Os resultados, mostrados na **tabela 5.3**, indicam um aquífero de altíssima transmissividade, com porosidade efetiva de 15% e difusividade hidráulica de 0,11 m²/s. Esses valores são considerados representativos das condições do aquífero em zonas de sumidouros e cavernas, ou seja, área de maior nível de carstificação de acordo com o zoneamento elaborado usando o método de resistividade elétrica (**figura 4.3**).

Tabela 5.3: Parâmetros hidrodinâmicos do aquífero Jandaíra em Furna de Pedra.

Método	T m ² /s	SyD	m ² /s
Jacob	2,0 x 10 ⁻²	0,13	0,15
Theis	1,1 x 10 ⁻²	0,16	0,07
Média	1,6x10⁻²	0,15	0,11

Devido ao caráter heterogêneo e anisotrópico, um pouco mais a sul da região do Sítio Furna de Pedra, mais precisamente na localização da Mina Mizu, os valores de transmissividade do aquífero Jandaíra tendem a serem bem menores, por estar inserida numa área de intercalação de folhelhos, como mostra o zoneamento elaborado por resistividade elétrica (**figura 2.3**). Em média, os dados de infiltração indicaram uma condutividade hidráulica de 1,5 m/d ($1,7 \times 10^{-5}$ m/s) que multiplicada por uma espessura média de 185 m, resulta em uma transmissividade média de $3,2 \times 10^{-3}$ m²/s (ATEPE, 2010).

Em testes mais recentes, feitos em poços da Mina Mizu e fazendas próximas, mostram que em um curto espaço podem haver mudanças significativas nos parâmetros. Observa-se poços de alta produtividade próximos a poços com características semelhantes aos poços de bombeamento da mina. Para ilustrar, entre vários casos, pode-se citar o poço 144 (cadastro) de propriedade do Sr. João Galdino. Na propriedade existem dois poços distantes cerca de 250 metros, um deles produz 58,5 m³/h, com rebaixamentos da ordem de 1,5 metros depois de 10 horas de bombeamento, enquanto o outro poço seca minutos depois.

5.2.4 – Potencialidades das Águas Subterrâneas

Na avaliação das potencialidades, pontos importantes como espessura do aquífero, porosidade e nível estático são fundamentais para a determinação das reservas que, por sua vez, quando agregado a informações de potenciometria e geologia colaboram com a geração de um modelo conceitual hidrogeológico.

5.2.4.1 – Espessura do aquífero

A potencialidade de um aquífero equivale ao volume total de água acumulada na zona de saturação do sistema aquífero que está sujeito à extração e equivale às reservas totais. Para esse tipo de análise, é importante que alguns dados sejam obtidos e analisados, um deles é a espessura saturada de ocorrência do aquífero.

A espessura saturada do aquífero Jandaíra, tema deste trabalho, é de fundamental importância para o cálculo ou estimativa de reservas. Os trabalhos realizados na região mostraram dados de poços com variadas profundidades.

ANA (2010) obteve uma amostragem de 1185 poços cadastrados no aquífero Jandaíra, na região entre Baraúna e Quixeré, a profundidade variou de 3 a 450 m, com média de 88 m. Medeiros (2006) mostrou que dos poços cadastrados no Município de Baraúna as profundidades dos poços variaram de 60 a 120 m. Estudos na Mina Mizu mostraram poços perfurados a 80 m de profundidade. Ainda de acordo com a SEMARH, a média da espessura saturada para a área é de cerca de 90 metros, variando de 50 a 150 m.

Analizando os dados dos estudos realizados na região, foi atribuído um valor hipotético para a espessura saturada do aquífero Jandaíra, a fim de obter resultados para os cálculos de reservas do aquífero, sabendo do comportamento heterogêneo e anisotrópico, característico dos aquíferos cársticos. Dessa forma, foi atribuído a média de 90 metros para a espessura saturada do aquífero Jandaíra na região de Baraúna com base em sondagens e perfis de poços.

5.2.4.2 – Estimativa das reservas permanentes e reguladoras

Sabendo dos valores da espessura saturada média avaliada para o aquífero Jandaíra na região de interesse, é possível estimar valores de reservas permanentes e reguladoras, sendo os conceitos de reservas apresentados a seguir.

Reservas permanentes – constituem as águas subterrâneas acumuladas no aquífero que não variam em função das precipitações, formam uma parcela que se situa abaixo dos

níveis de descarga locais ou regionais e permitem uma exploração mais intensa, regularizadas em períodos de vários anos.

Reserva reguladora – representam a quantidade de água livre armazenada no aquífero ao longo de um período de recarga natural. Estas reservas são as que mantêm relação com o balanço das águas subterrâneas e que são avaliadas a partir das variações piezométricas ou das curvas de esgotamento do escoamento superficial. Em geral, parte destas reservas reguladoras é que constitui os recursos exploráveis.

Para determinar a **reserva permanente** do Aquífero Jandaíra, no município de Baraúna, foram adotados os seguintes parâmetros:

- Para a **porosidade eficaz**, na falta de dados que permitissem calcular esse parâmetro para a totalidade da área, usou-se informações dos estudos do IPT (1982) nos quais admitiu-se o valor de 5% para o aquífero Jandaíra, e os dados de Batu (1998), que considerou o valor médio de 14% de porosidade eficaz para calcários. Desta forma, sabendo que a maior parte da área estudada se encontra pouco carstificada de acordo com o zoneamento apresentado no capítulo anterior (Figura 4.3), inferiu-se o valor citado de 5% para a porosidade eficaz do Aquífero Jandaíra na área em foco.
- O valor médio da **espessura saturada** da camada aquífera: 90 m.
- A **área de ocorrência** do aquífero referente a área de estudo: $675 \times 10^6 \text{ m}^2$.

Aplicando a fórmula a seguir, resulta em:

$$RP = A \times h \times \mu$$

Sendo:

RP = reserva permanente;

A = área de ocorrência: $675 \times 10^6 \text{ m}^2$.

h = valor médio da espessura saturada: 90m.

μ = porosidade eficaz inferida: 5%.

Desta forma, a **reserva permanente** estimada do Aquífero Jandaíra na região de Baraúna (área mostrada na figura 1.1) é de $3,037 \times 10^9 \text{ m}^3$.

Para determinar a **reserva reguladora**, foram adotados os seguintes parâmetros:

- Para a **porosidade eficaz** se considerou o mesmo valor de 5% que foi inferido no cálculo da reserva permanente;

- Valor médio da variação do nível estático na região: 10 m; valor baseado nos estudos de variação de nível estático elaborados na região de Baraúna.
- **Área de ocorrência** do aquífero referente à área de estudo: $675 \times 10^6 \text{ m}^2$.

Sabendo disto e usando a fórmula a seguir:

$$RR = A \times \Delta h \times \mu$$

Sendo:

RR = reserva reguladora;

A = área de ocorrência: $675 \times 10^6 \text{ m}^2$.

Δh = valor médio da variação do nível estático: 10m.

μ = porosidade eficaz inferida: 5%.

Desta forma, a **reserva reguladora** estimada do Aquífero Jandaíra na região de Baraúna (área mostrada na figura 1.1) é de **$337,5 \times 10^6 \text{ m}^3$** . Em 2008, a população de Baraúna era de 23.098, e os poços produtores de água tinham uma vazão de $70.920 \text{ m}^3/\text{dia}$ ou $25,886 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$, $3,07 \text{ m}^3/\text{hab.dia}$ (ANA, 2010). Dessa forma, pode se afirmar que o aquífero Jandaíra na região de Baraúna, seria capaz de abastecer o município por cerca de 13 anos, desconsiderando a evapotranspiração, e mantendo uma margem segura de exploração de 75% da reserva reguladora. Vale salientar que praticamente 100% das águas exploradas do Aquífero Jandaíra na área de estudo tem uso na irrigação.

A **reserva potencial total** estimada pode ser calculada somando a reserva permanente e a reguladora, dessa forma, chegou-se ao valor de $3,374 \times 10^9 \text{ m}^3$.

5.2.4.3 – Fluxo das Águas Subterrâneas

Para a elaboração do mapa potenciométrico, Medeiros (2006) realizou medições do nível d'água e nivelamento topográfico (**Figura 5.3**).

Ao observar o mapa potenciométrico e a configuração das curvas de isovalores potenciométricos, o que pode se concluir de formar preliminar é uma direção de fluxo subterrâneo para a região central da área, que corresponde ao domínio de maior exploração (Medeiros, 2006). De fato, isto pode estar relacionado a superexploração das águas nessa área, já que se trata do trecho com maior número de poços, e pode indicar que a superfície potenciométrica do aquífero esteja realmente sendo afetada, com geração de depressões, porém como afirmado no subcapítulo 5.4.3, a precipitação pluviométrica exerce forte influência sobre os níveis de água do aquífero. Apesar disso, pode se observar uma tendência

natural do fluxo subterrâneo regional de sudoeste para nordeste, essa orientação de fluxo é similar ao leve mergulho das rochas calcárias na região.

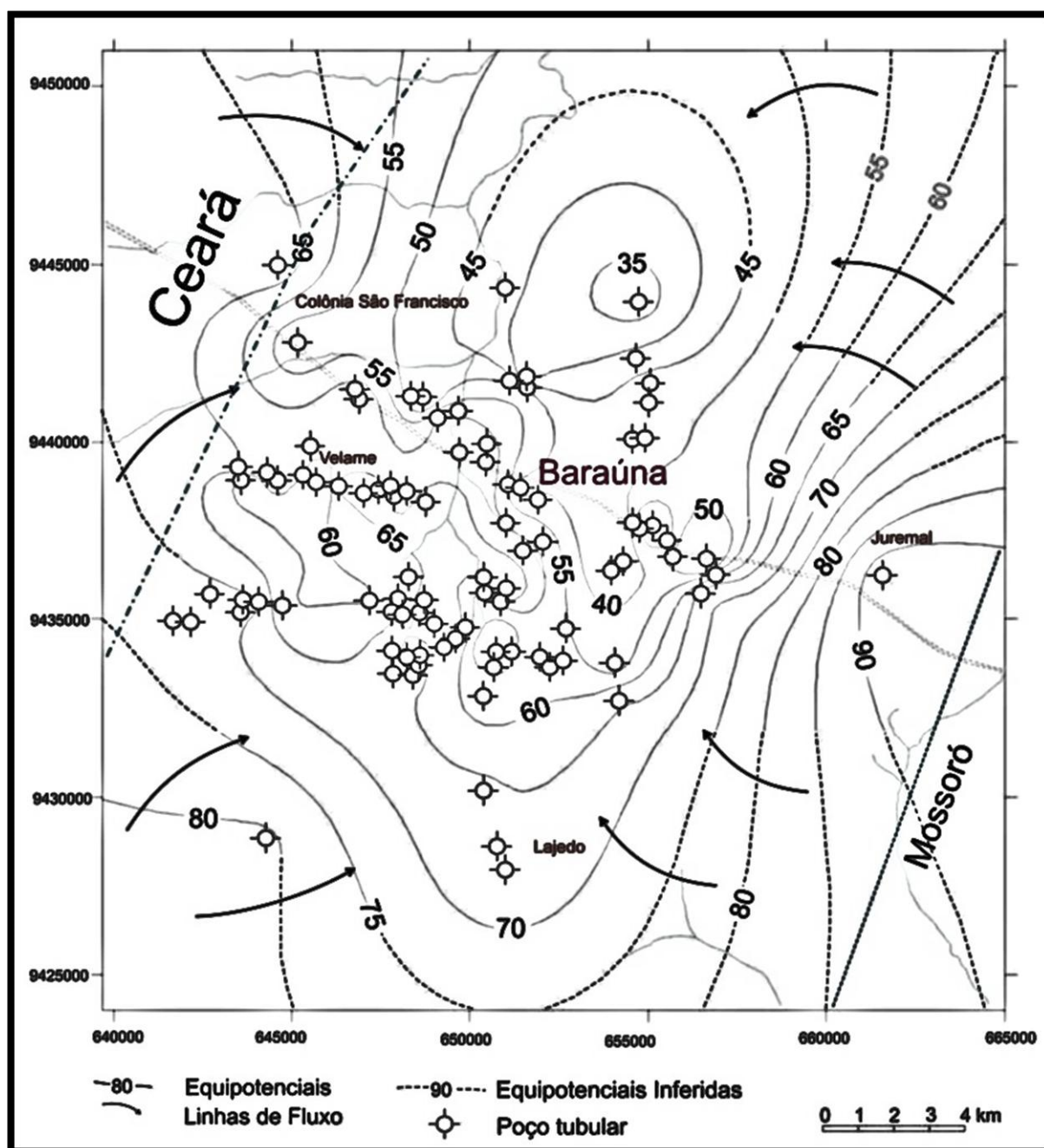


Figura 5.3: Mapa potenciométrico do aquífero Jandaíra na área de estudo. Modificado de Medeiros (2006).

Os gradientes hidráulicos na direção para norte e nordeste variam de 0,16% a 0,3% e na direção de sudeste para noroeste os gradientes são mais acentuados da ordem de 0,8%. Os gradientes são mais suaves e mais baixos na periferia da área tornando-se mais acentuados em direção a região de maior exploração (Medeiros, 2006).

5.2.4.4 – MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL

Sabendo das características dos aquíferos cársticos e dos dados adquiridos referentes à área de estudo, foram propostos inicialmente, dois modelos hidrogeológicos conceituais na tentativa de ilustrar as variações no nível de carstificação existente dentro da área de estudo. No entanto, baseado no mapeamento elaborado por Feitosa (2004) e na junção de modelos hidrogeológicos conceituais locais, foi construído um bloco diagrama que representa a área de interesse por completo, representando da forma mais fiel possível

Na elaboração do modelo conceitual foi tomado como base, mapeamentos geológicos e estruturais realizados na região e localmente na Mina Mizu, estudos estratigráficos, perfis construtivos de poços, mapeamento de fluxo e cursos de drenagens superficiais. Dessa forma, tentou-se ser o mais fiel possível às características da área. Vale salientar, que por se tratar de uma representação esquemática e na construção do modelo não foi utilizada escala gráfica.

O contexto estrutural mostra que os arranjos de fraturas e falhas têm direções preferenciais SW-NE e NW-SE, seguindo direções de falhas regionais da Bacia Potiguar. O calcário se apresenta bastante fraturado em praticamente toda a área, porém variando de pouco carstificado a áreas com inúmeras feições cársticas. As descrições de sondagens feitas na Mina Mizu (que está situada dentro da zona de carstificação elevada) apresentaram informações diversificadas evidenciando a heterogeneidade da rocha (**Figuras 2.6 e 2.7**). No geral, o calcário é compacto e fraturado com exceções para a existência de argilitos calcíferos, margas e calcarenitos e até mesmo calcário com ausência de fraturas.

As formações de cavernas e condutos estão atreladas diretamente a planos de acamamento, nos quais, calcários possuem menos resistência a “ação corrosiva” da água.

O fluxo de águas subterrâneas também deve ser levado em consideração na construção das feições cársticas, já que através dessa movimentação há uma predisposição a reação de dissolução típica dos sistemas cársticos. Outro fator importante a ser considerado, é

a existência de drenagens superficiais de água na parte norte da área, que podem ter influenciado no processo de recarga e consequentemente no nível de carstificação.

Analisando todos os fatores mencionados em conjunto, sem deixar de lado as características que em geral são frequentes em aquíferos cársticos, chegou-se ao bloco diagrama representativo do aquífero Jandaíra da região de Baraúna (**Figura 5.4**).

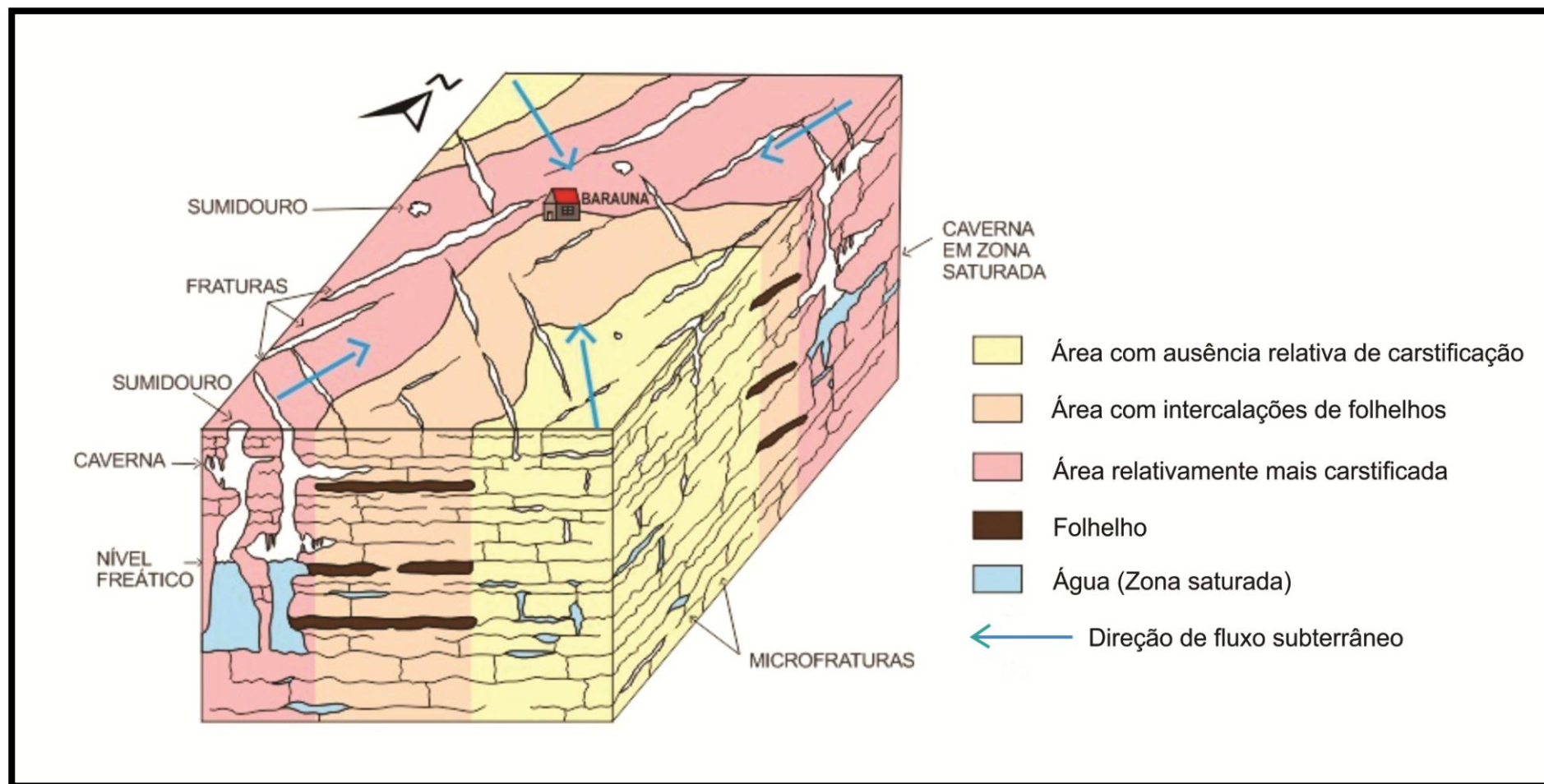


Figura 5.4: Bloco diagrama representativo do modelo hidrogeológico conceitual do aquífero Jandaíra na região de Baraúna.

Através dessa figura representativa, é possível gerar uma interpretação comportamental do aquífero, observando e analisando a variação no nível de carstificação da região e consequentemente indicando áreas de maiores potencialidades. Pode-se observar que a região mais carstificada possui um zoneamento similar as orientações de fraturas e fluxo natural das águas subterrâneas SW-NE, é essa área que corresponde as maiores medições de condutividade hidráulica e a maior potencialidade em águas subterrâneas (**Figura 5.5**). A intercalação de folhelhos ao calcário é um fator inibidor para a carstificação como também para a condutividade hidráulica devido ao seu caráter impermeável. Nos extremos NW e SE, os calcários são mais resistentes a corrosão, sofrem menos a influência de drenagens e também possuem menos sumidouros, e fraturas mais discretas, o que implica em um nível de carstificação relativo menor, assim como, sua potencialidade em armazenamento (**Figura 5.6**).

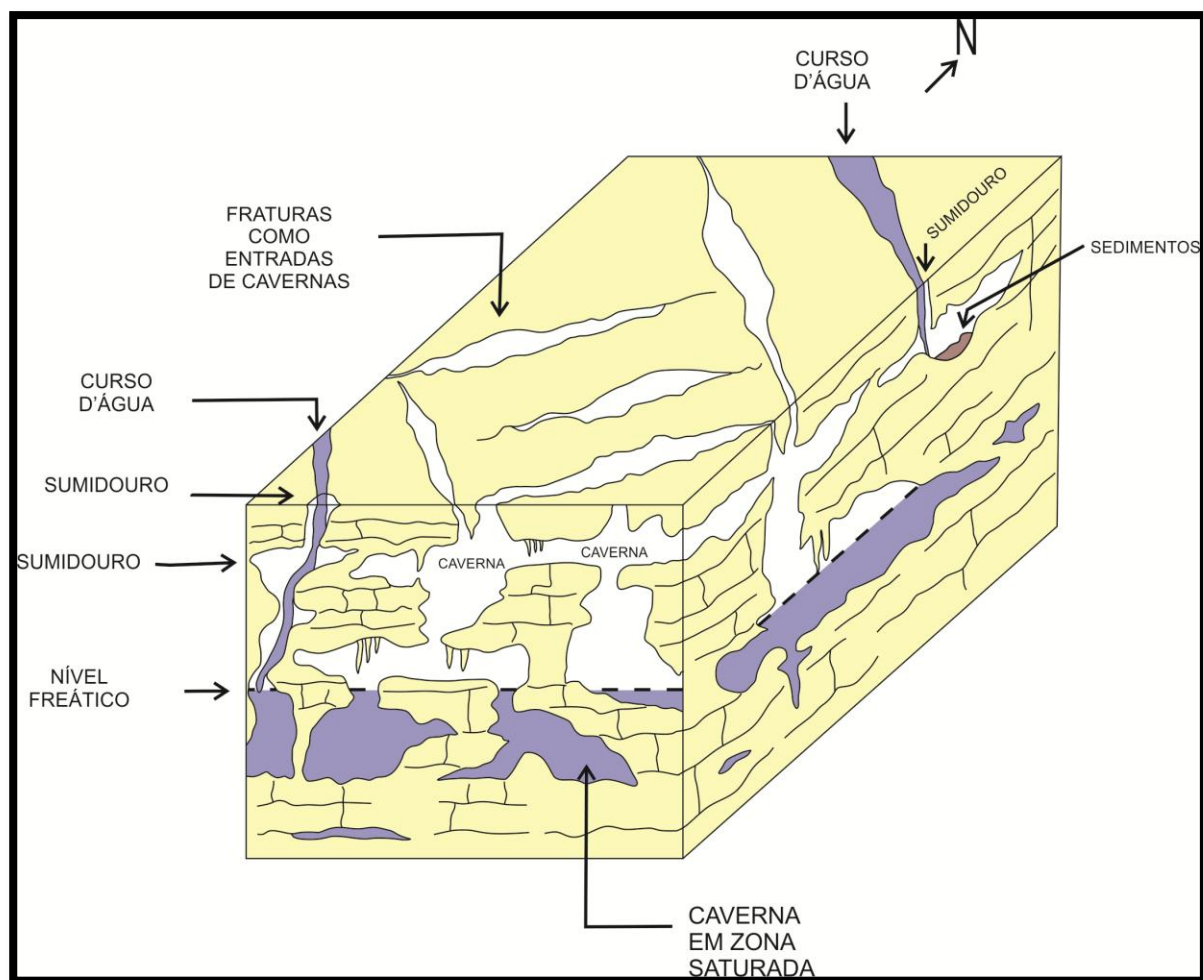


Figura 5.5: Modelo esquemático para a área relativamente mais carstificada.

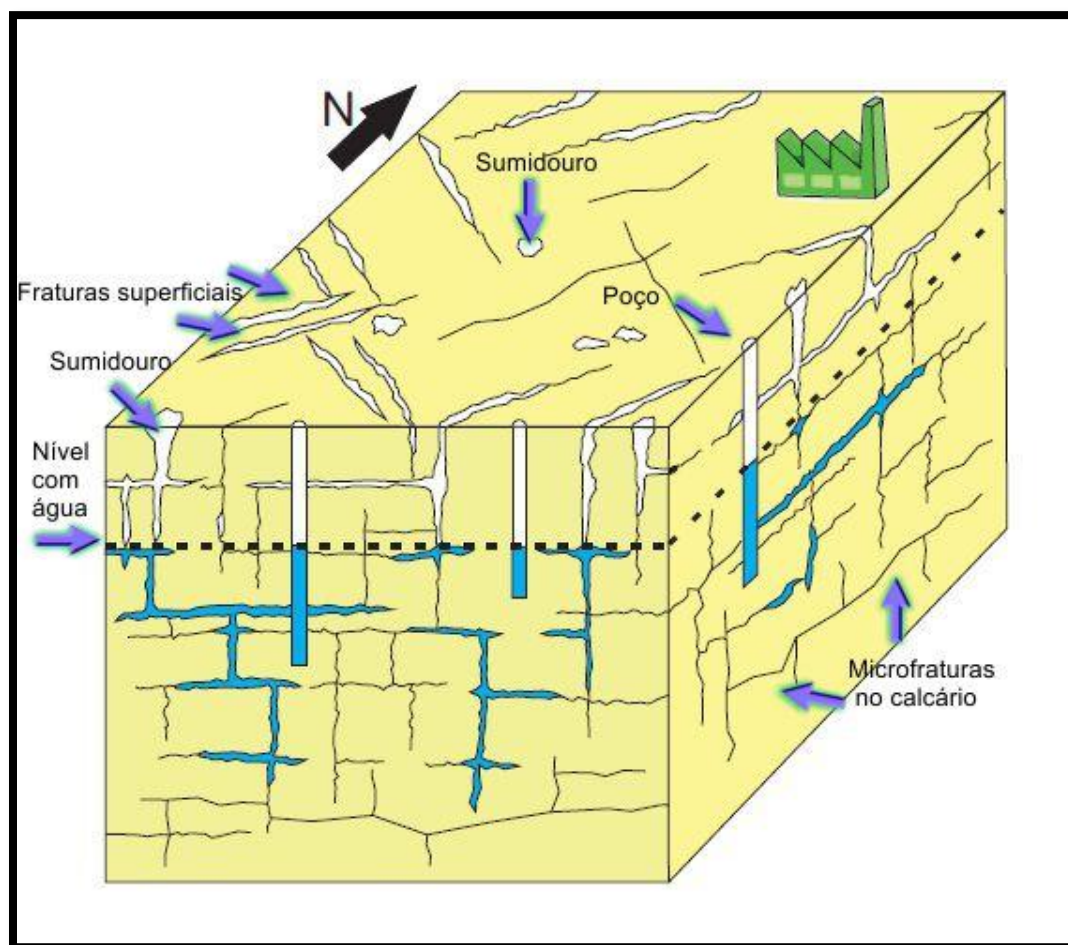


Figura 5.6: Modelo representativo para a área com ausência relativa de carstificação, área da Mina Mizu.

5.2.5 – Superexploração do aquífero e a influência das secas

Para a análise desse item foram usados principalmente, dados de estudos feitos em poços próximos a área de exploração da Mina Mizu.

A análise feita nessa área foi elaborada usando dados de monitoramento da SEMARH, que monitora a variação do nível estático em 134 poços tubulares que captam o aquífero Jandaíra desde 05 de maio de 2003. Foram obtidas as informações até 08 de agosto de 2013, ou seja, dez anos e três meses, no entorno da cidade de Baraúna. Infelizmente, esse monitoramento não foi contínuo e nem todos os poços tiveram a mesma quantidade de medidas. O poço que registrou a maior quantidade de medidas de NE foi o PB027 (nomenclatura SEMARH), com 81 observações. O poço com menor quantidade foi o PB605, com apenas uma medida. Na **tabela 5.4** é mostrada a frequência do número de medidas de nível estático nos poços.

Tabela 5.4: Frequências das medidas de nível estático nos poços.

Li	Ls	FO	FR(%)
0	10	46	34,3
10	20	34	25,4
20	30	22	16,4
30	40	12	9
40	50	8	6
50	60	8	6
60	70	3	2,2
70	82	1	0,7

Obs.: Li= Limite inferior de classe; Ls= Limite superior de classe; FO= Frequência observada; FR= Frequência observada relativa

A frequência média de observação do poço PB027 foi de uma medida a cada 45 dias. Porém, a maior parte dos poços teve poucas medidas. Até 10 medidas totalizaram 34,3% dos poços. Dos 134 poços, foram selecionados aqueles com pelo menos 20 medidas de NE, o que resultou em 54 poços. A distribuição desses poços é apresentada no mapa da **figura 5.7**.

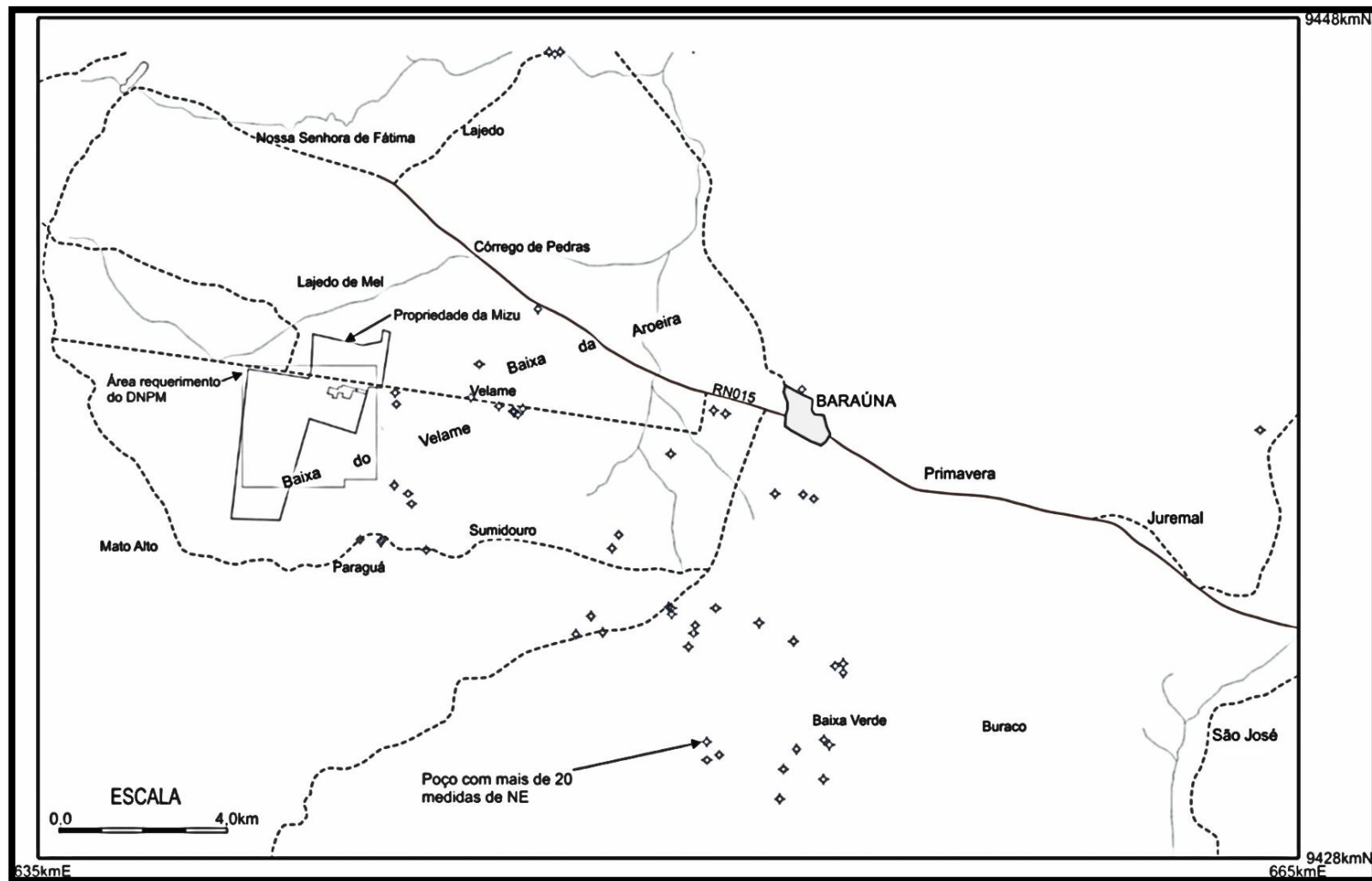


Figura 5.7: Poços monitorados pela SEMARH com pelo menos 20 medidas de NE.

Desses poços, foram selecionados aqueles que ficavam até cerca de 4 km da Mizu, reduzindo para 17 poços, cuja distribuição é mostrada no mapa da **figura 5.8**. Destes foram selecionados os 10 poços com mais observações de NE para se preparar o gráfico da evolução dos níveis estáticos durante os 10 anos de observação. Esses poços foram destacados em vermelho no mapa da **figura 5.8**.

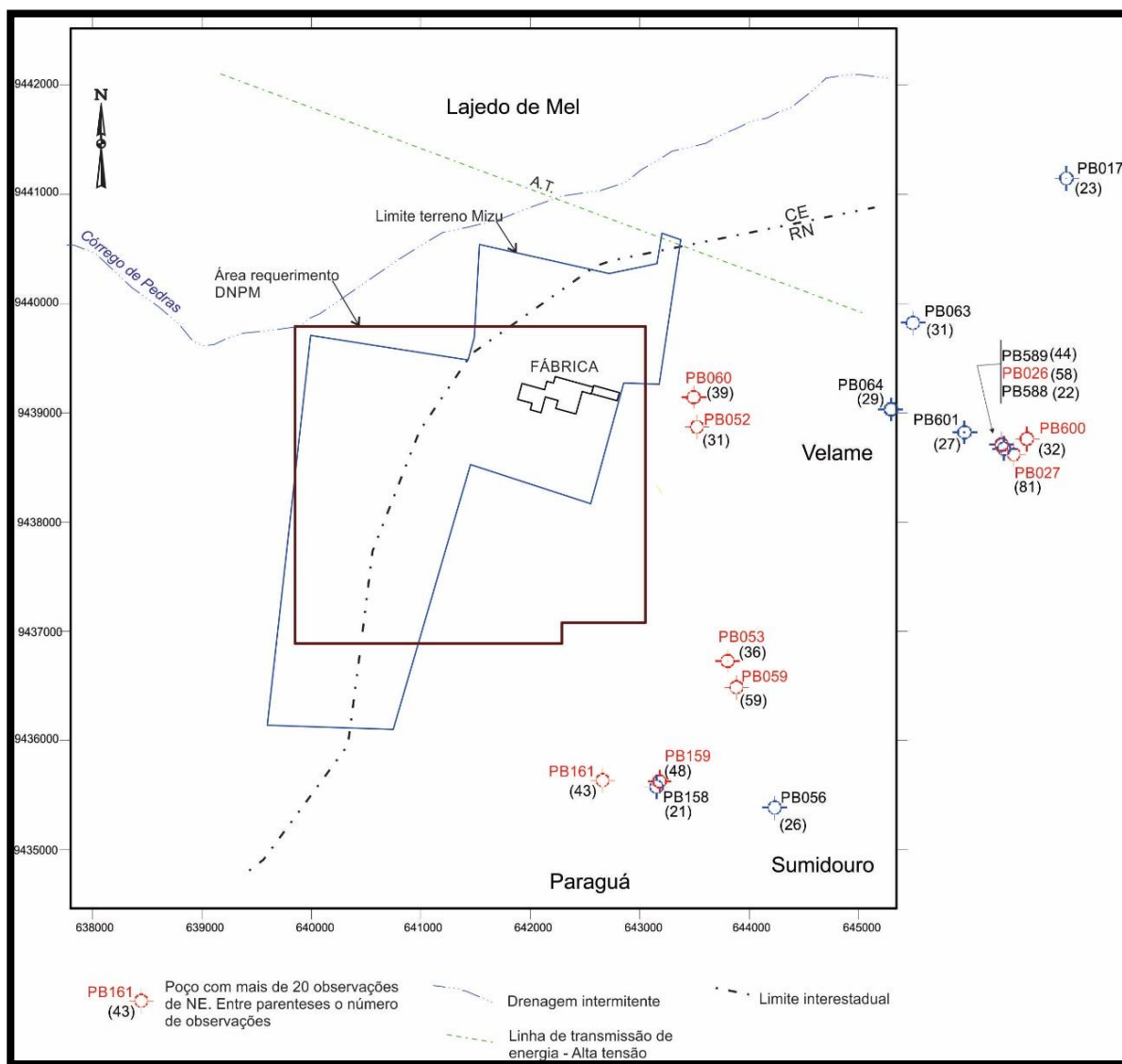


Figura 5.8: Distribuição dos poços com mais de 20 medidas de NE próximos à área de instalação da Mina Mizu.

Na análise da evolução do nível estático em cada poço é importante comparar cada curva da evolução de NE obtida com as precipitações ocorridas ao longo do período. Os dados de chuva foram obtidos na Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte – EMPARN, através do site <<http://www.emparn.rn.gov.br/>>. Os dados estão disponíveis a nível diário.

Nas **figuras 5.9 e 5.10** são apresentadas as curvas da evolução dos níveis estáticos dos poços próximos à Mizu, sendo agrupados cinco poços em cada figura.

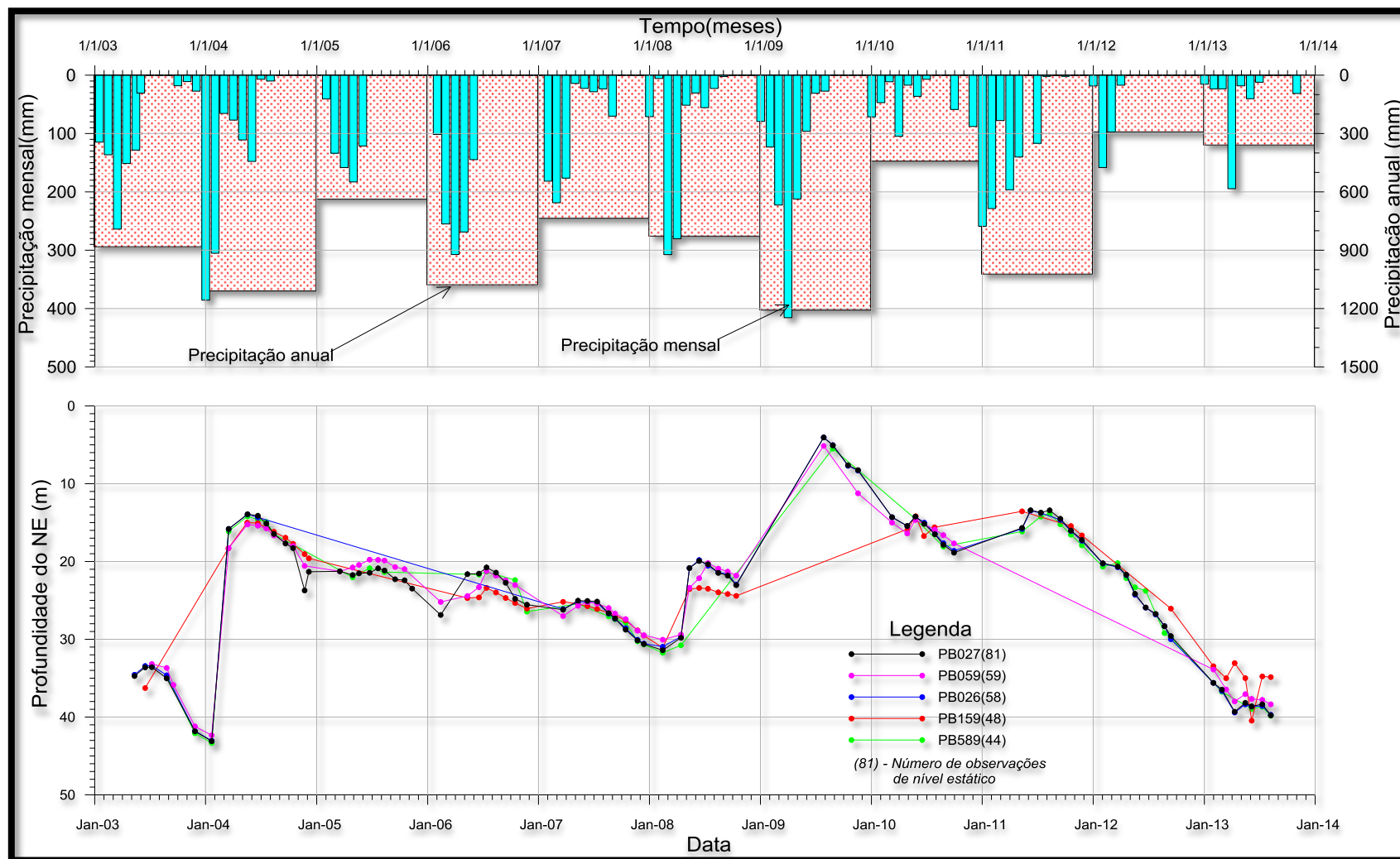


Figura 5.9: Evolução dos NE em cinco pontos do aquífero Jandaíra e da precipitação em Baraúna no período de 2003 a 2013.

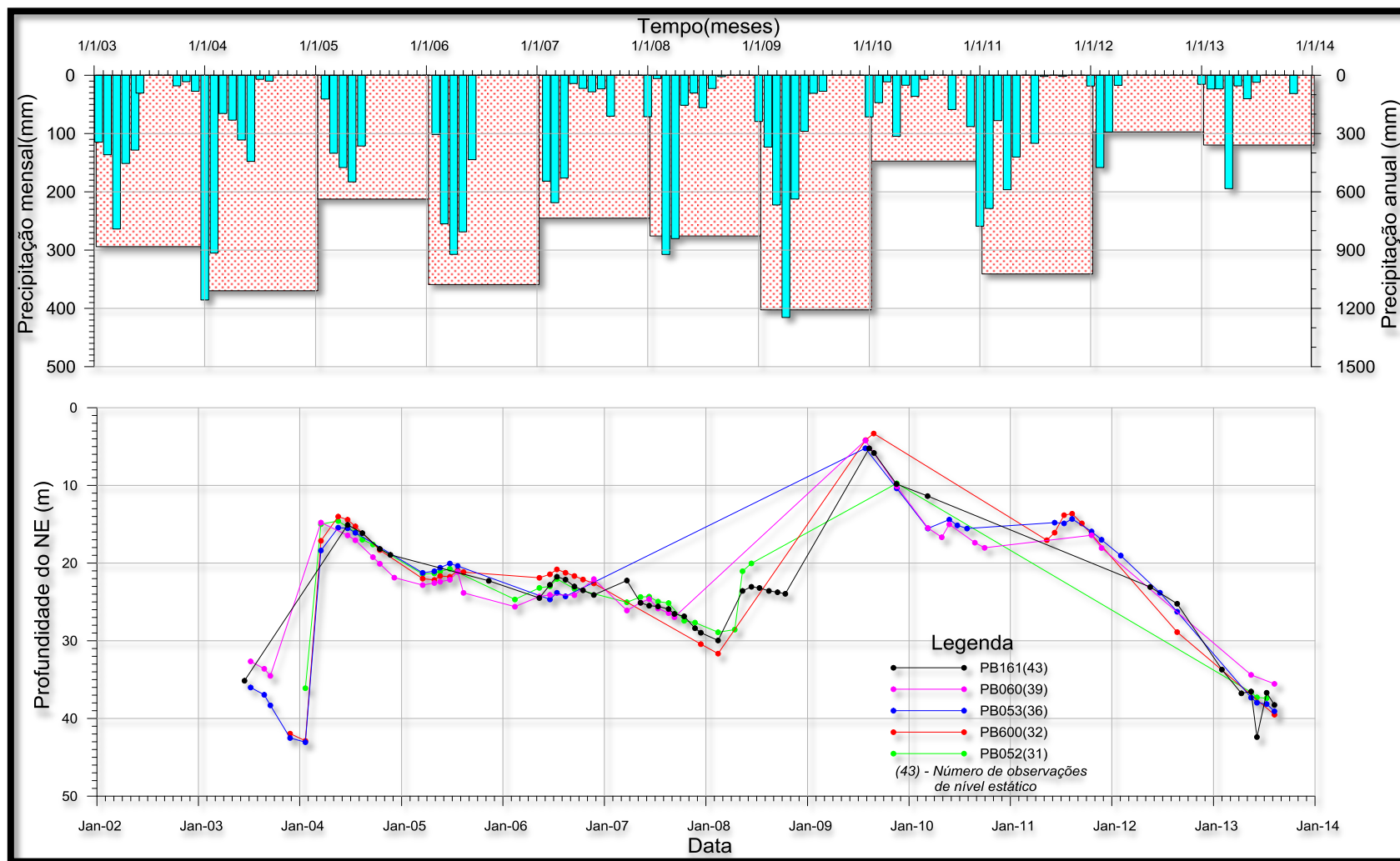


Figura 5.10: Evolução dos NE em cinco pontos do aquífero Jandaíra e da precipitação em Baraúna no período de 2003 a 2013.

O período amostrado coincidiu de situar-se entre dois grandes períodos de estiagem. Os gráficos de variação do nível estático em geral demonstram 4 intervalos com diferentes comportamentos das curvas de evolução desses níveis, no conjunto dos poços estudados. Tem-se os seguintes intervalos adotados neste estudo: janeiro/2003 a fevereiro/2004; março/2004 a abril/2008; março/abril 2008 a julho/agosto/2009; julho/agosto/2009 até 2013. A seguir é feita uma descrição e análise destes intervalos, conforme os gráficos.

- JANEIRO/2003 A FEVEREIRO/2004:

No início do monitoramento, em maio de 2003 os níveis estáticos estavam profundos, entre 33,0 e 37 metros, valor médio em torno dos 35,0 metros, com chuvas alcançando o valor de 290 mm no mês de março, e os níveis das águas subterrâneas continuaram aprofundando até início de janeiro de 2004 e alcançando valor da ordem de 43 metros (ver poços PB053/36, PB0600/32, PB027/81, PB059/59 nas **figuras 5.9 e 5.10**).

- JANEIRO/2004 A JUNHO/2004:

No início de janeiro/2004 o nível estático estava mais profundo na posição de 43,0 metros de profundidade, e nos meses subsequentes do mesmo ano (de março a junho/2004), recuperaram para 27,0 a 31,0 metros, alcançando a profundidade mais rasa, entre 12 e 16 metros. Embora não seja bem sintomático, é possível que as chuvas acumuladas entre 2003 e 2004, associadas talvez a uma menor taxa de bombeamento dos poços da região, tenham contribuído para essa subida/elevação abrupta do nível das águas subterrâneas em pouco mais de 4 meses do mesmo ano (de fevereiro a junho/2004).

- MARÇO/ABRIL 2004 A JULHO/AGOSTO/2009:

Embora os níveis das águas subterrâneas tenham tido uma grande recuperação no primeiro semestre de 2004, passando de 43,0 para 12,0 a 16,0 metros de profundidade, atestando um grande evento de recarga do aquífero Jandaíra, nos quatro (04) anos subsequentes (de 2004 a janeiro/2008), os gráficos ilustram um rebaixamento anual progressivo dos níveis das águas subterrâneas no intervalo de tempo citado. Portanto, constata-se um comportamento distinto e claramente mais lento de esgotamento temporal do aquífero comparado ao último evento mais rápido de recarga (ocorrida num período dos 6 primeiros meses do ano de 2004).

Da mesma forma, provavelmente este comportamento mais lento de rebaixamento temporal do nível das águas subterrâneas esteja concomitantemente associado à uma tendência de crescimento temporal anual das precipitações médias no intervalo entre 2004 a

2009 (principalmente em 2006; 2008 e 2009), fato este que deve ter favorecido uma reposição mais contínua das reservas renováveis do aquífero Jandaíra, provavelmente compensando a descarga subterrânea natural mais o rebaixamento provocado pela exploração dos poços.

Tomando como base os valores extremos mostrados nas **figuras 5.9 e 5.10**, esses variaram desde aproximadamente 13 metros de profundidade nos poços PB027/81 e PB600/32 no ano de 2004, até cerca de 32 metros de profundidade nos poços PB589/44 e PB600/32 no ano de janeiro/2008, caracterizando uma amplitude de variação do nível das águas subterrâneas (que tornou os níveis mais profundos) da ordem de 19 metros no intervalo de tempo considerado.

Desta forma, constata-se que entre janeiro/2004 e julho/2004 ocorreu uma rápida e grande recarga do aquífero Jandaíra num curto intervalo de tempo, na qual os níveis das águas subterrâneas recuperaram passando de uma posição média de 43,0 metros de profundidade, para posições mais rasas entre 12 e 16 metros, dando uma amplitude entre 27,0 e 31,0 metros. Por sua vez, nos quatro anos subsequentes (janeiro/2004 a janeiro/2008), a amplitude do rebaixamento dos níveis das águas subterrâneas alcançou a cifra de 19,0 metros, variando de 13,0 metros de profundidade até 32,0 metros de profundidade, mas num período de tempo bem mais longo.

Portanto, é notória a influência dos anos mais chuvosos nos processos temporais de recarga e no comportamento do nível das águas subterrâneas do aquífero Jandaíra, conforme constatada na tendência de crescimento temporal anual das precipitações médias no intervalo entre janeiro/2004 a julho/2009, fato este que permitiu uma reposição mais contínua das reservas renováveis do aquífero Jandaíra, contribuindo para um esgotamento natural mais lento, mesmo que tenha ocorrido rebaixamento devido a exploração por poços.

- JANEIRO/2008 a JULHO/2009:

Entre janeiro/2008 e julho/2009 destaca-se a ocorrência de um evento de recarga semelhante ao ocorrido entre janeiro e julho/2004, com mudança dos níveis das águas subterrâneas para um patamar mais raso (recuperação).

Tomando como base os valores extremos mostrados nas **figuras 5.9 e 5.10**, esses variaram desde aproximadamente 32,0 metros de profundidade nos poços PB600/32 e PB027/81 no ano de janeiro/2008, até posições mais rasas entorno de 4,0 metros nos poços PB027/81 e PB600/32, caracterizando uma amplitude de variação do nível das águas subterrâneas da ordem de 28 metros no intervalo de tempo considerado.

- JULHO/2009 a AGOSTO/2013:

Conforme citado anteriormente, o comportamento das chuvas entre 2003 e 2009 (**Figuras 5.9e 5.10**) mostra uma tendência média de crescimento das precipitações pluviométricas médias até 2009, anos estes no qual se registrou a maior precipitação registrada do período observado, de 1207,7 mm/ano. Seguiu-se uma tendência de diminuição das chuvas entre 2010 e 2014, cujos totais anuais de 2010, 2012, e 2013 em geral são inferiores aos demais anos da série analisada.

De acordo com os gráficos de evolução temporal dos níveis das águas subterrâneas, constata-se entre “2009 e 2014” uma tendência geral de rebaixamento progressivo dos níveis das águas subterrâneas. Neste caso, em julho/2009 os níveis das águas subterrâneas estavam posicionados de forma mais rasa (entre 4,0 e 6,0 metros), e foram rebaixados para posições mais profundas em julho/2013 (ficando entre 34,0 e 43,0 metros). Obteve-se desta forma uma amplitude máxima de variação do nível das águas subterrâneas da ordem de 39,0 metros, os quais praticamente se posicionaram no patamar mais baixa também registrado em janeiro/2004, praticamente o mesmo observado 10 anos atrás.

Ainda dentro do período citado, mais precisamente entre 2011 e 2012, nota-se uma ligeira recuperação dos níveis de água, mais uma vez influenciada pelo aumento das chuvas em relação ao ano anterior, os níveis variaram de 17 a 19 m (período de menores valores de precipitação) a 13 a 15 m (período de acréscimo de chuvas).

Nota-se que a maior amplitude de variação dos níveis das águas subterrâneas, que foi de 39,0 metros, se deu ao longo dos últimos 4 anos (2009 a 2013), coincidente praticamente com a diminuição das ocorrências de chuvas e aumento das estiagens no período considerado, especialmente a partir de 2010. Portanto, a falta de recarga sazonal do aquífero Jandaíra de forma mais efetiva nesses últimos 4 anos motivou a evolução do rebaixamento dos níveis das águas subterrâneas até alcançar os níveis equivalentes aos observados em janeiro/2004, comprometendo assim as reservas renováveis e explotáveis do sistema.

Portanto, é notória a influência dos anos mais chuvosos nos processos temporais de recarga e no comportamento do nível das águas subterrâneas do aquífero Jandaíra, conforme constatada pelas tendências de crescimento temporal anual das precipitações pluviométricas médias, especialmente observadas no intervalo entre 2004 e 2009. Isto permitiu uma reposição mais contínua das reservas renováveis do aquífero Jandaíra, e seu esgotamento mais lento e sustentável diante da exploração por poços no intervalo de tempo citado.

Diante disto, os dados revelam que as reservas renováveis podem ser recompostas no momento em que as precipitações pluviométricas voltem a ocorrer de forma mais regular na área. O tempo de recarga para recuperação das reservas renováveis tem variado entre 6 meses e 2 anos.

Os resultados de análises feitas nos poços da região oeste e sul de Baraúna podem elucidar o problema do rebaixamento do nível d'água na região, pois trabalhos anteriores apontavam para uma série de hipóteses causadoras do problema, como: superexploração das águas, intercalação de folhelhos e ineficiência na construção dos poços (SERHID, 2003), porém o que fica mais claro nos dados expostos, é que as secas prolongadas sejam o principal fator condicionante para o rebaixamento acentuado dos níveis d'água.

No entanto, de maneira alguma se deve ignorar o uso descontrolado ou a superexploração das águas e concentração dos poços na região de Baraúna, pois de forma direta, juntamente com a seca, acelera o processo de rebaixamento dos níveis de água nos poços dessa área.

5.2.5.1 – *Estimativa de recarga*

Para a análise da estimativa de recarga, foi escolhido o *método de variação de nível d'água* (VNA) por se encaixar no tipo de aquífero estudado e possuir uma rede de monitoramento que permitisse esse tipo de pesquisa. O método foi aplicado na rede de monitoramento utilizada para os estudos da zona de exploração da Mina Mizu.

O método VNA foi escolhido, porque além da facilidade e praticidade na aplicação, passa confiabilidade aos resultados. Mesmo assim, possui suas limitações, como mencionam Healy & Cook (2002) que o uso recomendado da técnica é apenas para aquíferos rasos, devido as flutuações abruptas do nível d'água, o que dificilmente ocorre em aquíferos profundos; e o fato do método não poder ser utilizado quando as taxas de recarga e descarga são equivalentes, pois assim a superfície freática não sofre elevação ou rebaixamento e o método estimaria uma recarga nula.

Dentro dos métodos físicos da zona saturada insere-se o método da variação do nível d'água (VNA) ou, em inglês, “*water table fluctuation*” (WTF). Este método é aplicado somente em aquíferos livres. Nele se considera principalmente a variação do nível estático como parâmetro. Coelho *et al.* (2012) acrescentam que esse método pode ser usado em grandes áreas, desde que possuam variações do nível d'água repentinas, comportamento

esperado em aquíferos rasos e regiões com altos índices de precipitação. Essas características definem bem nosso objeto de trabalho, o aquífero cárstico Jandaíra é livre e relativamente raso, tendo como zonas de recarga qualquer afloramento rochoso que demonstre a ocorrência de porosidade secundária por carstificação.

O método em foco é muito popular no Brasil, sendo bastante utilizado em diversas pesquisas nacionais. Dentre os vários estudos conhecidos, dois serviram como ponto de partida para este trabalho: um trabalho realizado em Rio Claro - SP de Neto e Kiang (2008) e um trabalho realizado em Viçosa – MG de Carvalho *et al.* (2014). Apesar da popularidade do método entre pesquisadores, este ainda não foi aplicado na região do Município de Baraúna.

O cálculo de recarga é feito utilizando a seguinte fórmula matemática (HEALY & COOK, 2002):

$$R = S_y \cdot dh/dt = S_y \cdot \Delta h / \Delta t$$

Em que: R = recarga; S_y = rendimento específico; Δh = variação da altura da superfície freática devido a um evento de recarga e Δt = tempo de duração do evento de recarga.

A equação de Healy & Cook (2002) concebe que a água que percola ao nível d'água é armazenada prontamente, e que o fluxo de base, a entrada e saída de fluxo subsuperficial e a evapotranspiração no subsolo são nulas durante o processo de recarga (GOMES, 2008).

De acordo com Healy & Cook (2002), o termo da equação Δh é determinado através da diferença entre o pico do hidrograma e o ponto mais baixo da curva de recessão extrapolada no mesmo instante em que o pico ocorre (**Figura 5.11**). Essa curva é baseada no trajeto que o gráfico teria caso não ocorresse o fenômeno da precipitação.

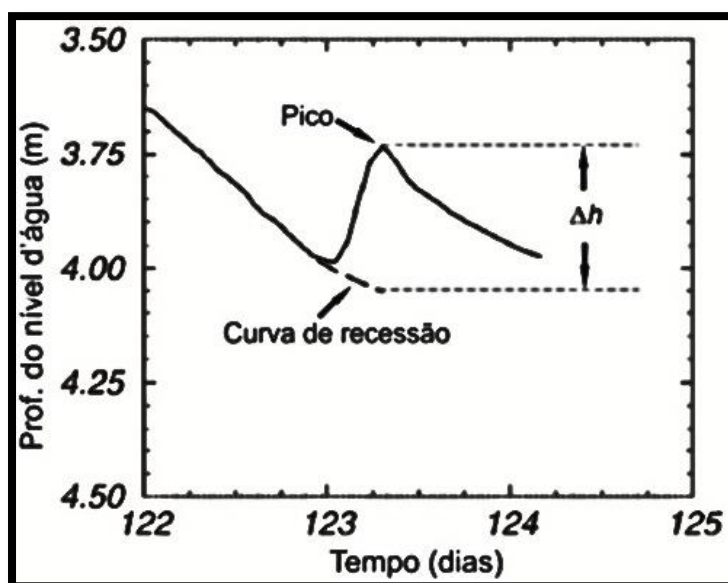


Figura 5.11: Diagrama esquemático para determinação de Δh . Adaptado de Healy & Cook, 2002.

Para o cálculo da recarga na área da Mina Mizu foi adotada o valor de 5% para o rendimento específico; o valor de Δh foi calculado usando a metodologia mostrada na **figura 5.11**; Δt é o período de 1 ano hidrológico, foi adotado o ano de 2008, por ter precipitação representativa da normalidade para a região (870 mm), por ter havido recarga depois de um longo período de seca, além de observações suficientes.

Dentro os poços, os escolhidos PB026, PB027, PB052, PB059, PB159 e PB161, por possuírem maior número de observações para o ano escolhido. Desta forma, chegamos aos valores de recarga para cada poço escolhido, como mostra a **tabela 5.5**.

Tabela 5.5: Cálculo de Δh , recarga e taxa de recarga para seis poços no ano de 2008.

Poço	h1	h2	Δh (m)	R (mm)	r (%)
PB026	31	20	11	478,5	55,0
PB027	31	20	11	478,5	55,0
PB052	28	20	8	348,0	40,0
PB059	30	20	10	435,0	50,0
PB159	31	24	7	304,5	35,0
PB161	30	23	7	304,5	35,0
Média	30,16	21,16	9	391,5	45,0

Sendo r = taxa de recarga.

O que pode-se perceber ao observar os resultados de recarga para a região de Baraúna, é uma ligeira resposta do aumento do nível das águas às chuvas que ocorreram no período. A recarga média dos poços escolhidos para essa análise foi de 391,5 mm e a taxa de recarga média de 45,% da precipitação.

Ao comparar as taxas de recargas obtidas neste trabalho com resultados de trabalhos elaborados em aquíferos não cársticos, vemos que esses resultados podem parecer absurdos, porém se deve considerar, o grande período de seca sofrido em anos anteriores, o que levou a uma longa recessão, além disso, os aquíferos cársticos fissurais, assim como o aquífero Jandaíra em seu contexto possuem características que permitem ou favorecem a infiltração rápida ou quase instantânea, pequenos volumes de água podem percolar as fissuras com grande facilidade, podendo variar significativamente em um curto espaço de tempo.

CAPÍTULO 6 – Conclusões e recomendações

6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os estudos e pesquisas em aquíferos cársticos sugerem uma série de dificuldades no entendimento do desenvolvimento e para a aquisição de dados que possam trazer resultados com boa margem de confiança, isso se deve as suas características de heterogeneidade e anisotropia. Além disso, o clima semiárido e a irregularidade das precipitações podem trazer conclusões precipitadas sobre vários questionamentos relacionados ao rebaixamento do nível das águas subterrâneas nessa região.

Os parâmetros hidrodinâmicos apontaram para uma significativa diferença entre áreas com maior nível de carstificação e as de menor nível de carstificação, nas áreas com nível de carstificação mais elevado foram obtidos resultados maiores de condutividade hidráulica e transmissividade, conseqüentemente, são essas áreas que apresentam uma maior potencialidade de armazenamento de águas subterrâneas. Observando os perfis de poços para determinar a profundidade do aquífero Jandaíra e inferindo a média de porosidade do calcário foi calculado valores de reservas para a região de modo que esse conhecimento possa ajudar em um melhor planejamento da exploração das águas subterrâneas na região. Com o intuito de colaborar ainda mais com a interpretação do aquífero Jandaíra, de modo que pudesse ser mostrados esquematicamente vários aspectos citados, foi criado um modelo hidrogeológico conceitual esquemático da área, um modelo bastante didático para os padrões, a observação deste modelo ajuda a compreender o porquê de tantos valores de parâmetros hidráulicos diferentes para o mesmo aquífero. Outro ponto importante a ser abordado é a influência da exploração das águas subterrâneas no fluxo subterrâneo, o mapa de fluxo deixa claro que além da tendência natural de fluxo SW-NE, existe um cone de depressão no setor de maior exploração de águas subterrâneas, no centro da área de estudo.

Quanto a análise dos níveis estáticos, o que pode se afirmar é que não existe apenas um fator determinante para o rebaixamento dos níveis de água do aquífero Jandaíra na região de Baraúna, o que pode se observar é que além de secas prolongadas, há também um crescimento rápido e contínuo de poços perfurados na região, além disso, outro fator que confirma a ideia da superexploração é que o cálculo de recarga feito para a região mostra um grande poder de recuperação dos níveis de água, característica típica de aquíferos cársticos.

As recomendações feitas aqui se baseiam nos estudos propostos e análises produzidas em trabalhos anteriores, como é mostrado a seguir:

- Aperfeiçoamento nos estudos relacionados ao comportamento e desenvolvimento do aquífero, dessa forma, buscando entender o processo de evolução dos carstes e possíveis problemas associados, como também, preservar estes monumentos da natureza.
- Continuação do monitoramento dos níveis e volumes de águas, de modo que se possa controlar e planejar a exploração das águas subterrâneas, considerando os períodos de estiagem e o processo de recarga do aquífero.
- Monitoramento da qualidade das águas subterrâneas nos setores de maior exploração, áreas de desenvolvimento a fruticultura irrigada e zona urbana, visando obter informações sobre consequências do uso de fertilizantes, como também do desenvolvimento urbano.

Capítulo 7– Referências

7– REFERÊNCIAS

A

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Avaliação dos Recursos Hídricos Subterrâneos e Proposição de Modelo de Gestão Compartilhada para os Aquíferos da Chapada do Apodi, entre os Estados do Rio Grande do Norte e Ceará. Relatório Final. Brasília/DF: ANA, 2010.

ARARIPE, P.T., FEIJÓ, F.J. 1994. Bacia Potiguar. Boletim de Geociências da PETROBRÁS. Rio de Janeiro, 8(1):127-141.

ARARIPE, P. T. & FEIJÓ, F. 1995. Bacia Potiguar. Boletim de Geociências da Petrobras, 8 (1): 127-141.

ATEPE. Estudo hidrogeológico do aquífero Jandaíra, subsídio para implantação da mina de calcário da maré cimento LTDA, no município de Baraúna – RN. Relatório técnico. 2010.

B

BACK, W (1960). Origin of hydrochemical facies in groundwater in the Atlantic Coastal plain. Proceedings, International Geological Congress (Copenhagen), 1:87-95.

BACK W (1966). Hydrochemical facies and groundwater flow patterns in northern part of the Atlantic Coastal plain. U. S. Geological Survey Professional Paper 498-A.

BATU, V. (1998), - Aquifer Hydraulics. Wiley, 752 pp.

BERTANI, R. T.; COSTA, I. G. & MATOS, R. M. D. 1990. Evolução tectonosedimentar, estilo estrutural e habitat do petróleo na Bacia Potiguar. In: Raja Gabaglia, G. P., Milani, E. J. (eds.) Origem e evolução de bacias sedimentares. Rio de Janeiro: PETROBRAS, p.291-310

C

CÂMARA, R. N. 2010. Mapeamento litofaciológico da Formação Jandaíra (bacia potiguar), na porção sudeste da folha Mossoró-RN. Relatório de Graduação – Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, p. 82.

COELHO, V. H. R.; ALMEIDA, C das N.; SILANS, A. M. B. P. Análise da flutuação do nível d'água para estimativa da recarga subterrânea da bacia representativa do Rio Grande do Norte no nordeste brasileiro. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* Vol. 17 n. 2 Abr/Jun, p. 241 — 252, 2012.

CÓRDOBA, V.C., 2001. A Evolução da Plataforma Carbonática Jandaíra durante o Neocretáceo na Bacia Potiguar: Análise paleoambiental, diagenética e estratigráfica. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Tese Doutorado, p.239.

CUNHA, J.B. & MILLO, J.L. 1984. Dados Climatológicos do Nordeste. Anexo IV- Dados de Evapotranspiração Média Diários. Versão Preliminar. SUDENE, Recife.

CUSTÓDIO, E., LLAMAS, M. R. 2001. *Hidrologia Subterrânea*. 2ed. Barcelona: Omega. p. 274.

D

DE CASTRO, D.L., BEZERRA, F. H. R., SOUSA, M. O. L., FUCK, R. A., 2012. Influence of Neoproterozoic tectonic fabric on the origin of the Potiguar Basin, northeastern Brazil and its links with West Africa based on gravity and magnetic data. *Journal of Geodynamics*. 54: 29-42.

DNOCS (Departamento Nacional de Obras Contra as Secas). 2009. Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), referentes à implantação do Projeto de Irrigação Santa Cruz do Apodi, situado nos municípios de Apodi e Felipe Guerra, no Estado do Rio Grande do Norte. Rio Grande do Norte: Acquatool Consultoria.

E

EDMUNDS WM (1981). Hydrogeochemical investigations. In: Case-studies in groundwater resources evaluation. Ed by J.W. Lloyd. Clarendon Press, Oxford, pp 87-112.

F

FEITOSA, E. C. O aquífero Jandaíra no município de Baraúna/ RN – Atualização dos conhecimentos. Secretaria de Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte (SERHID) / Fundação de Apoio ao Desenvolvimento da UFPE (FADE), Natal, RN, 1994.

FEITOSA, E.C., 2004a. O Aquífero Jandaíra no Município de Baraúna/RN – Atualização dos Conhecimentos. ANA/PróÁgua Semiárido/SERHID RN – FADE/LABHID/UFPE. Recife, relatório inédito. (Zoneamento dos calcários aquíferos e mapeamento das áreas de maior índice de carstificação através do método geofísico de eletrorresistividade).

FEITOSA, E.C., 2004b. O Calcário Jandaíra na Área da Baixa do Felix – Município de Quixeré – Ceará: Estudo por Eletrorresistividade da Área do Bessa. LABHID-FADE-UFPE/Delmonte Fresh Produce Brasil Ltda, Recife, relatório inédito.

FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. Groundwater. New Jersey: Prentice Hall, 1979. 604p

G

GOMES, L. H. Determinação da recarga profunda na bacia-piloto do Ribeirão da Onça em zona de afloramento do sistema aquífero Guarani a partir de balanço hídrico em zona saturada. 2008. 167 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)- Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2008.

H

HEALY, R.W. & COOK, P.G. Using groundwater levels to estimate recharge. Hydrogeology Journal, 10, p. 91 — 109, 2002.

I

IBGE. Censo Demográfico. www.ibge.gov.br; 2010a.

IPT. Estudo Hidrogeológico Regional do Estado do Rio Grande do Norte, São Paulo, IPT/SIC (Relatório 15.795 – volume1). 1982.

M

MACPHERSON, G. L. AND M. A. TOWNSEND, 1998, Chapter 5, Water chemistry and sustainable yield: in "Perspectives on Sustainable Development of Water Resources in Kansas", Bulletin, 239, Kansas Geological Survey, p. 117-157.

MANDEL, S. AND SHIFTAN, Z.L., 1981. Groundwater Resources (Water pollution). Academic Press Inc., U.S. 269 páginas.

MANOEL FILHO, J. Contaminação das Águas Subterrâneas In: Feitosa, Fernando A. C. Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. Fortaleza: CPRM/REFO, LABHIDUFPE, 2000. p. 109-132.

MANOEL FILHO, J., DEMETRIO, J. G., COSTA, W. D. 2003. Diagnóstico da Situação Atual e Possibilidades de Ampliação da Exploração de Água subterrânea na Zona Oeste da Bacia Potiguar. Fundação de Ciências, Aplicações e Tecnologia Espaciais – FUNCATE/FADE/UFPE.

MEDEIROS, A. B. et al. Aspectos hidrogeoquímicos e de qualidade das águas do aquífero Jandaíra na região de Baraúna, RN. In: GEOLOGIA do Nordeste, 21., 2005, Recife. Simpósio ... Recife, 2005.

MEDEIROS, A. B. Avaliação hidrogeoquímica e qualidade das águas para irrigação no município de Baraúna- RN. Dissertação (Mestrado em geociências). UFRN. 2006.

MISTRETA, G. O. 1984. Aquífero Jandaíra da Bacia Potiguar. 1984. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1984.

N

NETO, D. C.; KIANG, C. H. Aplicação do método de flutuação de nível da água para a estimativa de recarga -- Exemplo do aquífero Rio Claro. *Águas Subterrâneas*, V.22, N.01, P.39--48, 2008.

O

OLIVEIRA, R. G. 2008. Arcabouço Geofísico, Isostasia e Causas do Magmatismo Cenozóico da Província Borborema e de Sua Margem Continental (Nordeste do Brasil). Tese de doutorado, Pós-graduação em Geodinâmica e Geofísica – UFRN. 415p.

P

PESSOA NETO, O.C. 1999. *Análise estratigráfica integrada da plataforma mista (siliciclástica-carbonática) do Neogeno da Bacia Potiguar, NE do Brasil*. Curso de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Dissertação de Mestrado, 220 p.

PESSOA NETO, O. C. 2007. Litoestratigrafia da Bacia Potiguar. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, 15 (2) p.357-369.

S

SAMPAIO A.V., SCHALLER, H. 1968. *Introdução à Estratigrafia da Bacia Potiguar*. Rio de Janeiro/RJ. *Boletim Técnico PETROBRÁS*, 11(1):19-44.

SEMARH-RN. Análise das águas do Aquífero Jandaíra em apoio ao programa água doce no rio grande do norte (PAD/RN). XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. P. 10, 2010.

SERHID. Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Rio Grande do Norte. Plano Estadual de Recursos Hídricos. Caracterização hidrogeológica dos aquíferos do Rio Grande do Norte. Natal, 1998a.

SERHID. Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Rio Grande do Norte. Plano Estadual de Recursos Hídricos. Caracterização Hidroquímica dos Aquíferos do Rio Grande do Norte. Natal, 1998b.

SERHID. Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Rio Grande do Norte. Diagnóstico Preliminar das Causas que Afetam o Rebaixamento do Nível Potenciométrico do Aquífero Jandaíra – Região de Baraúna/RN. Natal, 2003.

SILVA, A. B. Capítulo 3.2 – hidrogeologia de meios cársticos. Curso de hidrogeologia de aquíferos cársticos. Núcleo de estudos hidrogeológicos do meio ambiente da UFBA (NEHMA), 39p. 1995.

SOUZA, Z. S.; VASCONCELOS, P. M.; NASCIMENTO, M. A. L.; SILVEIRA, F. V.; PAIVA, H. S.; SILVEIRA DIAS, L. G.; VIEGAS, M. C. D.; GALINDO, A. C.; OLIVEIRA, M. J. R. Geocronologia e geoquímica do magmatismo cretácico a terciário do NE do Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 42. 2004, Araxá. Resumos. Minas Gerais: Sociedade Brasileira de Geologia, 2004. 1 CD-ROM.

STEIN, P. e MELO, J.G. (2006). Potencial Hidrogeológico e Caracterização Hidrogeoquímica do Aquífero Açú na Borda Sul da Bacia Potiguar no Trecho Apodi Upanema, RN. Revista Brasileira de Recursos Hídricos 11, pp. 171-181.

W

WHITE, I. Comment on: “A natural gradient experiment on solute transport in a sand aquifer: spatial variability of hydraulic conductivity and its role in the dispersion process” by E. A. Sudicky. Water resources research., v. 24, n. 6, p 892 – 894. 1988.

Documentos Eletrônicos

Caracterização do clima, solo, vegetação, relevo, recursos hídricos, e aspectos sócio-econômicos do município de Mossoró. Disponível em: www.idema.rn.gov.br/perfil_g.asp. 2009.

*Capítulo 8 – Artigo submetido ao
Boletim do Museu Paraense Emílio
Goeldi. Ciências Naturais.*

Influência das Estações Chuvosas na recarga do Aquífero Jandaíra, região de Baraúna, Rio Grande do Norte, Brasil

Renan da Costa Oliveira^I, José Geraldo de Melo^{II}, José Braz Diniz Filho^{III}, José Geilson Alves Demétrio^{IV}, Jadson Gomes da Silva^V

Resumo: O aquífero Jandaíra constitui a unidade hidrogeológica objeto deste trabalho. Trata-se de um aquífero de rochas carbonáticas utilizado no suprimento hídrico da população urbana (Baraúna) e rural, principalmente na produção de fruticultura irrigada. O aquífero Jandaíra é um aquífero cárstico-fissural com uma grande variabilidade nos parâmetros hidrodinâmicos o que se atribui ao seu caráter heterogêneo e anisotrópico, com frequentes descontinuidades características. A recarga do aquífero se dá por infiltração direta de águas de chuva, embora de maneira não uniforme em função da distribuição espacial das estruturas cársticas (sumidouros, dolinas, riachos intermitentes), controladas por estruturas tectônicas (falhas, juntas, etc.). O aquífero é bastante afetado pela superexploração atribuído à atividades agrícolas, como também sofre a influência das secas periódicas que ocorrem na região. Os resultados demonstraram que o processo de recarga é rápido, pois os níveis de águas nos poços se recuperam rapidamente nos períodos chuvosos.

Palavras-chave: aquífero Jandaíra; aquífero cárstico; superexploração; recarga.

Abstract: The Jandaíra aquifer constitutes the hydrogeological unit and it is the object of this work. It is an aquifer of carbonate rocks used in the water supply of urban and rural population, especially in the production of irrigated orcharding. The Jandaíra aquifer is a karst-fissure aquifer with a large variability in hydrodynamic parameters that is attributed to its heterogeneous and anisotropic character, with frequent features discontinuities. The aquifer recharge occurs by direct infiltration of rainwater, although non-uniformly, in function of the spatial distribution of karst structures (sinks, sinkholes, intermittent streams), controlled by tectonic structures (faults, joints, etc.). The aquifer is quite affected by overexploitation attributed to agricultural activities, but also is influenced by the periodic droughts that occur in the region. The results showed that the charging process is fast because water levels in wells recover quickly in the rainy periods.

Key-words: Jandaíra aquifer; karst aquifer; overexploitation; charging.

INTRODUÇÃO

O uso das águas subterrâneas vem se tornando cada vez mais importante para o país, principalmente para as regiões que mais sofrem com períodos longos de estiagem. Essa tendência é explicada pelo crescimento do consumo, a degradação dos corpos d'água superficiais e longos períodos de estiagem. No Rio Grande do Norte, são 32 municípios abastecidos por mananciais subterrâneos (poços), 90 por fontes superficiais e 45 pelos dois tipos de mananciais (SIAEM, 2015).

No entanto, há alguns problemas no uso destas águas, com destaque para a superexploração e a contaminação dos reservatórios subterrâneos (Medeiros, A. B., 2006). A extração intensa de grandes volumes de água por bombeamento do subsolo aliado à longos períodos de seca, podem levar ao colapso no abastecimento das cidades que utilizam. À curto prazo, apenas os mananciais de água subterrânea como fonte, principalmente em aquíferos mais rasos. Para que haja um melhor planejamento e equilíbrio na exploração das águas subterrâneas, é importante considerar aspectos como a disponibilidade e recarga do aquífero.

O objetivo deste trabalho é elucidar o problema do rebaixamento dos níveis de águas subterrâneas e estimar a recarga do aquífero Jandaíra, que se trata de um aquífero livre (freático), através do método da variação do nível d'água (VNA). Para isso foram utilizados os dados de monitoramento de poços da SEMARH-RN. O presente artigo apresenta os resultados da aplicação da técnica VNA ao aquífero Jandaíra, num trecho da porção noroeste da Bacia Potiguar/RN-CE, mais precisamente na região do município de Baraúna-RN E QUIXERÉ/CE.

A justificativa para o estudo é a tentativa de elucidação do problema do rebaixamento dos níveis das águas subterrâneas do Aquífero Jandaíra na região de Baraúna/RN, associando não somente ao efeito antropogênico de exploração do aquífero, como também a influência natural das estações chuvosas no processo.

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada na Chapada do Apodi, na região fronteira entre os Estados do Ceará e Rio Grande do Norte, estando nela incluídas partes dos municípios de Quixeré-CE e Baraúna-RN. Ocupa uma superfície total de 60 km², onde está incluída uma

área requerida ao DNPM (9,0 km²) pela empresa de fabricação de Cimento MIZU, a área da mineração de calcários (1,8 km²), e a área da própria Fábrica Mizu. A área está compreendida mais ou menos entre as coordenadas UTM 9435000 m e 9441000 m Norte e entre as coordenadas UTM 639000 m e 644000 m Leste (**Figura 1**). Convém ressaltar, que a área de estudo, contempla uma significativa margem da região sudoeste do Município de Baraúna.

A região apresenta relevo relativamente aplainado, semelhante ao que se encontra no restante da Chapada do Apodi, apresentando em vários pontos, áreas bastante carstificada com a presença de cavernas, dolinas e sumidouros e a altitude varia de 90 m a 130 m. A agricultura irrigada é a principal utilização e ocupação do solo.

CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS

O **clima** da área é do tipo Bsh segundo a classificação Koeppen (Koeppen, 1936), ou seja, é do tipo semiárido, caracterizado pela ocorrência de duas estações bem distintas, uma de chuvas, denominada de inverno, que dura cerca de quatro meses, e uma estação de estiagem, para os oito meses restantes do ano hidrológico.

As estações meteorológicas com dados de **temperatura** mais próximas da área da Mizu, estão localizadas nos municípios de Jaguaruana-CE, distante cerca de 30km, e a estação de Mossoró, distante cerca de 45km. Segundo a Agência Nacional de Águas (ANA, 2010), as temperaturas médias mensais, na área, entre o período de 1961 e 1990 (normal climatológica) oscilam entre 24° e 28,7°C.

Em ambos os postos a variação da **umidade** ao longo do ano fica em torno dos 20%. Variando entre 82% a 67% no posto de Jaguaruana e de 78% a 61% no posto de Mossoró. Os meses mais úmidos entre março e junho e os mais secos entre setembro e dezembro.

Não existem normais climatológicas para o período de 1961 a 1990 para os **ventos**. Existem apenas dados para estação Aracati-CE para o período 1911-1942, segundo Sudene, 1963. Os ventos dominantes são de NE a SE. A velocidade dos ventos cresce de abril até setembro, atingindo um máximo de 5,0 m/s (18,0 km/h). As menores velocidades ocorrem em abril com valores de 2,8 m/s (10,0 km/h).

Em ambos os postos (Mossoró e Jaguaruana) a **insolação** mínima ocorre entre fevereiro e abril, com valores de 190 h/mês, e os valores máximos entre agosto e outubro, chegando a 300 h/mês.

Dos parâmetros climatológicos analisados até agora a **precipitação** é, sem dúvida, o mais importante para a água subterrânea, pois é a infiltração dos excedentes hídricos que recarrega os aquíferos. O posto pluviométrico mais próximo da área da fábrica cimento Mizu fica em Baraúna, operado pela EMATER-RN. Segundo a ANA os registros históricos disponíveis para esse são desde 1962. Normalmente as precipitações anuais ficam próximas a 365,0 mm. Destaca-se a precipitação ocorrida em 1985 de 2662,2 mm, a maior precipitação registrada até hoje. A precipitação mínima foi de 91,5 mm, ocorrida em 1993.

GEOLOGIA

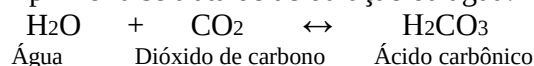
A área de estudo está inserida na Bacia Potiguar, Grupo Apodi e mais precisamente compreende uma cobertura de carbonatos correspondentes a Formação Jandaíra, que é constituído de calcários cinzas, cremes, margas, siltitos, argilitos e dolomitos cremes. Estudos regionais indicam que a espessura da Formação Jandaíra pode chegar a 600 m na porção mais profunda da Bacia Potiguar, embora as espessuras mais importantes, do ponto de vista hidrogeológico do aquífero cárstico Jandaíra, tenham sido registradas entre 50 e 150 m, e poços com vazões variando entre 10 a 50 m³ h⁻¹, conforme Mistreta (1984).

Os aquíferos cársticos têm sido cada vez mais alvos de pesquisas pelo mundo, suas peculiaridades e características tem levantado a curiosidade dos cientistas, que não só vêm como um importante reservatório, mas também como possível responsável por problemas geotécnicos. Esse tipo de aquífero possui diversos aspectos próprios que dificultam os estudos e mesmo existindo alguns estudos sobre eles, cada nova pesquisa merece atenção especial e adaptação dos métodos as condições encontradas.

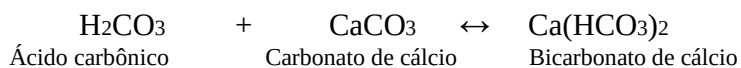
A existência ou desenvolvimento do aquífero cárstico, como também de todo sistema cárstico-fissural possui alguns fatores condicionantes: a litologia, que oferece maior capacidade de dissolução da rocha; as estruturas desenvolvidas no corpo rochoso (fraturas, falhas, sumidouros e planos de estratificação), que possibilitam a percolação da água e o contato e dissolução de camadas inferiores do maciço rochoso; e o clima, que de fato será o fator mais importante para a elaboração e desenvolvimento do aquífero, pois é responsável pelo fornecimento da água.

A evolução desse tipo de aquífero está ligada e controlada diretamente por duas reações químicas:

A primeira se trata de acidulação da água:



A segunda se trata da dissolução carbonática pelas águas ácidas:



De maneira geral, os estudos referentes a águas subterrâneas vêem o armazenamento e a movimentação das águas nos aquíferos como consequência dos parâmetros hidrodinâmicos característicos, o que já não corresponde ou não é característico dos aquíferos cársticos-fissurais (**Figura 2**). O fenômeno cárstico é o conjunto de transformações que ocorrem em uma região de rochas carbonáticas como consequência da circulação da água. Estas transformações são o que distingue o meio cárstico dos demais meios aquíferos e é o resultado da procura natural do equilíbrio químico entre a água e as rochas carbonáticas. Neste processo de transformação a água é o elemento ativo transitório e a rocha carbonáticas o passivo permanente. Quando cessa a atividade da água os fenômenos cársticos deixam de ocorrer e as rochas carbonáticas permanecem passivas e sujeitas a novas ações do elemento água. A ocorrência do fenômeno cárstico está condicionada a circulação e a atividade da água que por sua vez é sujeita a fatores geológicos, geográficas e climáticas. Estes fatores são variáveis ou cíclicos, o que provoca uma intermitência na circulação hídrica através das rochas e conseqüentemente uma ação descontínua nas transformações do meio cárstico (SILVA, A. B. 1995). Desta maneira poderá haver feições cársticas desenvolvidas em distintos períodos geológico-climáticos, em função da própria evolução da geomorfologia cárstica.

METODOLOGIA

O estudo foi desenvolvido envolvendo etapas de pesquisas bibliográficas, aquisição de dados em poços monitorados pela SEMARH e a utilização da técnica de estimativa de recarga.

Das diversas técnicas utilizadas para a estimativa da recarga de um aquífero, o método escolhido para este trabalho, a variação de nível d'água (VNA), pode ser considerado “não convencional” ou incomum para esta área.

Scanlon *et al.* (2002) organizam as técnicas de estimativa de recarga com base em três diferentes zonas do solo, de acordo com a fonte em que os dados são obtidos: zonas

superficial, insaturada e saturada. Para cada uma as técnicas são classificadas em físicas, químicas (uso de traçadores) ou modelos numéricos.

As técnicas baseadas na leitura de níveis d'água em poços estão entre os métodos mais aplicados na determinação da recarga. Isso ocorre devido a facilidade em se estimar a recarga através das variações temporais ou padrões espaciais de leituras dos níveis freáticos (HEALY & COOK, 2002). Porém, para a região de Baraúna-RN ainda não é de conhecimento, qualquer trabalho que tenha utilizado esse método para este tipo de avaliação.

RECARGA

A recarga de um aquífero pode ser explicada como o processo de percolação da água da superfície terrestre no solo, atravessando seu perfil até que atinge a superfície freática do aquífero (camada saturada do subsolo), assim aumentando o volume de água disponível no reservatório aquífero. Pode ocorrer de modo natural (precipitação) ou artificial (irrigação). Alguns fatores que interferem nesse processo são: a condutividade hidráulica vertical do meio, a transmissividade do aquífero e a capacidade de infiltração de água no solo (POEHLS & SMITH, 2009).

MÉTODO DA VARIAÇÃO DO NÍVEL D'ÁGUA (VNA)

Dentro dos métodos físicos da zona saturada insere-se o método da variação do nível d'água (VNA) ou, em inglês, “*water table fluctuation*” (WTF). Este método é aplicado somente em aquíferos livres. Nele se considera que o aumento do nível d'água nos aquíferos não confinados ocorre somente por causa da elevação do lençol freático. Coelho *et al.* (2012) acrescentam que esse método pode ser usado em grandes áreas, desde que possuam variações do lençol freático repentinas, comportamento esperado em aquíferos rasos e regiões com altos índices de precipitação. Essas características definem bem nosso objeto de trabalho, o aquífero cárstico Jandaíra é livre e relativamente raso, tendo como zonas de recarga qualquer afloramento rochoso com estruturas cársticas de recarga possíveis (dolinas, sumidouros, etc).

O método em foco é muito popular no Brasil, sendo bastante utilizado em diversas pesquisas nacionais. Dentre os vários estudos conhecidos, dois serviram como ponto de partida para este trabalho: um trabalho realizado em Rio Claro - SP de Neto e Kiang (2008) e um trabalho realizado em Viçosa – MG de Carvalho; Rezende; Paes; Betim e Marques

(2014). Apesar da popularidade do método entre pesquisadores, este ainda não foi aplicado na região do Município de Baraúna.

O método VNA foi escolhido, porque além da facilidade e praticidade na aplicação, passa confiabilidade aos resultados. Mesmo assim, possui suas limitações, como mencionam Healy & Cook (2002) que o uso recomendado da técnica é apenas para aquíferos rasos, devido as flutuações abruptas do nível d'água, o que dificilmente ocorre em aquíferos profundos; e o fato do método não poder ser utilizado quando as taxas de recarga e descarga são equivalentes, pois assim a superfície freática não sofre elevação ou rebaixamento e o método estimaria uma recarga nula.

O cálculo de recarga é feito utilizando a seguinte fórmula matemática (HEALY & COOK, 2002):

$$R = Sy.dh/dt = Sy.\Delta h/\Delta t \quad (1)$$

Em que: R = recarga; Sy = rendimento específico; Δh = variação da altura da superfície freática devido a um evento de recarga e Δt = tempo de duração do evento de recarga.

A equação (1) concebe que a água que percola ao nível d'água é armazenada prontamente, e que o fluxo de base, a entrada e saída de fluxo subsuperficial e a evapotranspiração no subsolo são nulas durante o processo de recarga (GOMES, 2008).

De acordo com Healy & Cook (2002), o termo da equação (1) Δh é determinado através da diferença entre o pico do hidrograma e o ponto mais baixo da curva de recessão extrapolada no mesmo instante em que o pico ocorre (**Figura 3**). Essa curva é baseada no trajeto que o gráfico teria caso não ocorresse o fenômeno da precipitação.

Um outro termo importantíssimo para a recarga e que deve ser calculado, é o rendimento específico, que se trata do volume de água descarregada por um aquífero livre por unidade de área superficial por decréscimo unitário do nível d'água (carga hidráulica) (KRUSEMAN & RIDDER, 2000). Vários autores mencionam a importância deste parâmetro para a variação do nível d'água e nos modelos matemáticos de águas subterrâneas. É calculado de acordo com a equação a seguir (HEALY & COOK, 2002).

$$Sy = n - Sr \quad (2)$$

POÇOS DE MONITORAMENTO DO NÍVEL D'ÁGUA

O cadastramento dos poços existentes é sem dúvida etapa fundamental em qualquer caracterização hidrogeológica, pois é a partir dele que se pode obter informações importantes, tais como: profundidade do nível estático, potenciometria preliminar do aquífero, aspectos da qualidade da água, usos da água subterrânea, capacidade de produção dos poços, entre outras.

Foi considerada a área para a realização do cadastro a área de requerimento do DNPM (Processo DNPM 848.518/2007) da empresa Mizu, expandida, em média 2,4 km para cada lado, formando um retângulo de 7,54 km de lado, na direção leste-oeste e 8,03 km de lado na direção norte-sul, totalizando 60,58 km² ou 6058,0 ha.

Foi utilizado como base para o cadastro de poços, o levantamento realizado pela Agência Nacional de Águas – ANA, em 2010, e o cadastro das sondagens realizadas durante a pesquisa da mina de calcário da Mizu, sendo relacionados setenta poços do cadastro da ANA e trinta e seis sondagens da malha 400 x 400 metros e dezenove sondagens da malha 200 x 200 metros, totalizando cento e vinte e cinco pontos para serem visitados. A partir dessas informações foi montado um mapa (**figura 4**), que serviu de base para os trabalhos de campo durante o cadastramento. Todos os poços foram localizados em campo, porém, dezesseis sondagens não foram localizadas. Foram acrescentados à base do cadastro inicial, trinta e um, novos poços, que foram construídos na área entre 2010 e junho de 2013.

Na **figura 5** é apresentado o mapa definitivo dos poços e sondagens cadastrados. Como se pode observar, a área de cadastro foi um pouco maior do que a área previamente estabelecida. Não se poderiam perder as informações dos poços que estavam próximos ao limite pré-estabelecido.

Na **tabela 1** são mostrados os quantitativos dos poços com relação ao uso. Retirando as sondagens de pesquisa da Mizu o uso dominante, como já esperado, é a irrigação, totalizando 55,32% dos poços tubulares cadastrados. Os poços sem uso definido basicamente são aqueles que ainda não foram instalados.

Vinte e quatro poços foram encontrados fora de operação, sem bomba instalada, e das sondagens apenas duas não tinham sido obstruídas.

Foi possível medir o nível estático (NE) em 60 poços e a condutividade elétrica (CE) em 87 poços, enquanto a vazão em apenas 11 poços.

Os níveis estáticos medidos variaram de 15,81 m a 53,90m e a CE entre 920 $\mu\text{S/cm}$ 1550 $\mu\text{S/cm}$. Considerado 0,64 como o fator de conversão para sólidos totais dissolvidos, a variação foi de 588,8 mg/L e 992,0 mg/L, abaixo de 1000,0 mg/L, que é o valor máximo permissível para a água ser considerada potável, pelo Ministério da Saúde (portaria 2914/11), em relação ao STD.

As vazões variaram entre 2,5 m^3/h e 55,0 m^3/h . Apesar de se ter apenas onze informações de vazão, os dados mostram uma grande variação na capacidade de produção dos poços/aquífero, refletido a grande heterogeneidade e anisotropia do meio cárstico.

Em abril de 2014, com a aquisição do medidor de vazão ultrassônico, marca Site lab modelo SL1188P, foi feita a medida das vazões de vinte e dois poços e a medição de nível estático em sessenta poços do cadastro.

Na **tabela 2** são mostradas as vazões medidas nos poços e na **tabela 3** os níveis estáticos obtidos em abril de 2014.

A vazão média foi de 30,14 m^3/h enquanto a vazão mínima foi de 2,2 m^3/h e a máxima 68,5 m^3/h . A quantidade de medições de vazão realizadas é pequena em relação à quantidade de poços cadastrados. A principal explicação para esse fato é que muitos poços tinham sido desativados por conta do longo período de estiagem.

Em cinquenta e quatro poços foram feitas medidas de nível em junho de 2013 e em abril de 2014 (dez meses depois) o que possibilitou o cálculo da variação do nível estático (ΔNE) nesses poços para este período, cujos resultados são apresentados na **tabela 4**.

Em quatro poços a variação do NE foi considerada anômala, com o módulo dos valores superiores a 11,0. Desconsiderando-se os quatro valores anômalos, apenas em três poços os NE foram menores em abril de 2014 do que em junho de 2013, ou seja, os níveis da água nos poços subiram. Nos quarenta e sete poços restantes os níveis foram maiores, indicando que os níveis da água nesses poços desceram. Os valores anômalos e os níveis estáticos mais elevados só podem ser explicados por efeitos localizados, que fogem ao nosso controle.

No mapa da **figura 6** é mostrada a variação do NE entre junho de 2013 e abril de 2014, permitindo uma análise espacial. Percebe-se que a região central do mapa, onde está a mina e fábrica da Mizu, é onde ocorreram as menores variações de NE. Essa porção do mapa é alongada na direção NE-SW. Provavelmente, o fator que mais esteja influenciando nesse alongamento seja a disposição dos poços de bombeamento, mas também pode haver

influência das estruturas, uma vez que, a direção desse alongamento coincide com uma direção estrutural preferencial. É difícil separar quanto é por causa do arranjo dos poços de bombeamento e quanto é estrutural, não se tem elementos suficientes para fazer essa distinção.

RENDIMENTO ESPECÍFICO

A estimativa do rendimento específico considerou o cálculo da condutividade hidráulica (K) através de uma fórmula empírica que relaciona esses parâmetros, usada em Maziero (2008), denominada de equação de Biecinski (4) (PAZDRO, 1983, In: ALVARES e NIEDZIELSKI, 1996).

$$Sy = 0,117 \cdot \sqrt[7]{K} \quad (4)$$

Na equação (4) a condutividade hidráulica deve ser expressa em m·dia⁻¹.

A condutividade hidráulica foi obtida através da realização de *slugtests*. O ensaio foi realizado nos poços Pb-02, Pb-03, Pb-04 e Pb-05. Os dados gerados foram processados, aplicando o método de Bouwer & Rice (BOUWER & RICE, 1976) e Hvorslev.

PLUVIOMETRIA

Os dados de precipitação para o período de monitoramento considerado foram obtidos através de um posto pluviométrico que está localizado em Baraúna-RN, operado pela EMATER-RN.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

PLUVIOMETRIA

As precipitações compreendidas nesse monitoramento vão desde maio de 2003 a janeiro de 2014. A série histórica foi composta pela média de 11 anos de dados (2003-2014). Destacando-se positivamente, o ano de 2009 com 1207,7 mm/ano, e negativamente os anos de 2012 e 2013 com respectivamente.

CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

Na **tabela 5** são apresentados os dados de condutividade hidráulica, obtidos através do *slugtest*, e os de rendimento específico, estimados por meio da equação (4).

Os resultados obtidos no ensaio de bombeamento do poço Pb-03 e nos slug testes mostram que o aquífero Jandaíra na área da Mizu é de baixíssima produtividade. As descargas encontradas são compatíveis com poços secos e a condutividade hidráulica semelhante as das argilas.

REBAIXAMENTO DO NÍVEL D'ÁGUA E A INFLUÊNCIA DAS SECAS

A análise feita nessa área foi elaborada usando dados de monitoramento da SEMARH, que monitora a variação do nível estático em 134 poços tubulares que captam o aquífero Jandaíra desde 05 de maio de 2003. Foram obtidas as informações até 08 de agosto de 2013, ou seja, dez anos e três meses, no entorno da cidade de Baraúna. Infelizmente esse monitoramento não foi contínuo e nem todos os poços tiveram a mesma quantidade de medidas. O poço que registrou a maior quantidade de medidas de NE foi o PB027 (nomenclatura SEMARH), com 81 observações. O poço com menor quantidade foi o PB605, com apenas uma medida. Na **tabela 6** é mostrada a frequência do número de medidas de nível estático por poço.

A frequência média de observação do poço PB027 foi de uma medida a cada 45 dias. Porém, a maioria dos poços tiveram poucas medidas. Até 10 medidas totalizaram 34,3% dos poços. Dos 134 poços foram selecionados os com pelo menos 20 medidas de NE, o que resultou em 54 poços. A distribuição desses poços é apresentada no mapa da **figura 7**.

Desses poços foram selecionados aqueles que ficavam até cerca de 4 km da Mizu, reduzindo para 17 poços, cuja distribuição é mostrada no mapa da **figura 8**. Destes foram selecionados os 10 poços com mais observações de NE para se preparar o gráfico da evolução dos níveis estáticos durante os 10 anos de observação. Esses poços foram destacados em tons de cinza claro no mapa da **figura 8**.

Na análise da evolução do nível estático em cada poço é importante comparar cada curva obtida com as precipitações ocorridas ao longo do período. Os dados de chuva foram obtidos na Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte – EMPARN, através do *site* <<http://www.emparn.rn.gov.br/>>. Os dados estão disponíveis a nível diário.

Nas **figuras 9 e 10** são apresentadas as curvas da evolução dos níveis estáticos dos poços próximos à Mizu, sendo agrupados cinco poços em cada figura.

O período amostrado coincidiu de situar-se entre dois grandes períodos de estiagem. Os gráficos de variação do nível estático em geral demonstram 4 intervalos com diferentes comportamentos das curvas de evolução desses níveis, no conjunto dos poços estudados. Tem-se os seguintes intervalos adotados neste estudo: janeiro/2003 a fevereiro/2004; março/2004 a abril/2008; março/abril 2008 a julho/agosto/2009; julho/agosto/2009 até 2013. A seguir é feita uma descrição e análise destes intervalos, conforme os gráficos.

- JANEIRO/2003 A FEVEREIRO/2004:

No início do monitoramento, em maio de 2003 os níveis estáticos estavam profundos, entre 33,0 e 37 metros, valor médio entorno dos 35,0 metros, com chuvas alcançando o valor de 290 mm no mês de março, e os níveis das águas subterrâneas continuaram aprofundando até início de janeiro de 2004 e alcançando valor da ordem de 43 metros (ver poços PB053//36, PB0600/32, PB027/81, PB059/59 nas **figuras 9 e 10**), quando as chuvas voltaram com maior intensidade (385,6 mm/mês).

- JANEIRO/2004 A JUNHO/2004:

No início de janeiro/2004 o nível estático estava mais profundo na posição de 43,0 metros de profundidade, e nos meses subsequentes do mesmo ano (de março a junho/2004), recuperaram de 27,0 a 31,0 metros, alcançando a profundidade mais rasa entre 12 e 16 metros. Embora não seja bem sintomático, é possível que as chuvas acumuladas entre 2003 e 2004, associadas talvez a uma menor taxa de bombeamento dos poços da região, tenham contribuído para essa subida/elevação abrupta do nível das águas subterrâneas em pouco mais de 4 meses do mesmo ano (de fevereiro a junho/2004).

- MARÇO/ABRIL 2004 A JULHO/AGOSTO/2009:

Embora os níveis das águas subterrâneas tenham tido uma grande recuperação no primeiro semestre de 2004, passando de 43,0 para 12,0 a 16,0 metros de profundidade, atestando um grande evento de recarga do aquífero Jandaíra, nos quatro (04) anos subsequentes (de 2004 a janeiro/2008), os gráficos ilustram um rebaixamento anual progressivo dos níveis das águas subterrâneas no intervalo de tempo citado. Portanto, constata-se um comportamento distinto e claramente mais lento de esgotamento temporal do aquífero comparado ao último evento mais rápido de recarga (ocorrida num período dos 6 primeiros meses do ano de 2004).

Da mesma forma, provavelmente este comportamento mais lento de rebaixamento temporal do nível das águas subterrâneas esteja concomitantemente associado à uma tendência de crescimento temporal anual das precipitações médias no intervalo entre 2004 a 2009, fato este que deve ter favorecido uma reposição mais contínua das reservas renováveis do aquífero Jandaíra, provavelmente compensando a descarga subterrânea natural mais o rebaixamento provocado pela exploração dos poços.

Tomando como base os valores extremos mostrados nas **figuras 9 e 10**, esses variaram desde aproximadamente 13 metros de profundidade nos poços PB027/81 e PB600/32 no ano de 2004, até cerca de 32 metros de profundidade nos poços PB589/44 e PB600/32 no ano de janeiro/2008, caracterizando uma amplitude de variação do nível das águas subterrâneas (que tornou os níveis mais profundos) da ordem de 19 metros no intervalo de tempo considerado.

Desta forma, constata-se que entre janeiro/2004 e julho/2004 ocorreu uma rápida e grande recarga do aquífero Jandaíra num curto intervalo de tempo (6 meses), na qual os níveis das águas subterrâneas recuperaram passando de uma posição média de 43,0 metros de profundidade, para posições mais rasas entre 12 e 16 metros, dando uma amplitude entre 27,0 e 31,0 metros. Por sua vez, nos quatro anos subsequentes (janeiro/2004 a janeiro/2008), a amplitude do rebaixamento dos níveis das águas subterrâneas alcançou a cifra de 19,0 metros, variando de 13,0 metros de profundidade até 32,0 metros de profundidade, mas num período de tempo bem mais longo.

Portanto, é notória a influência dos anos mais chuvosos nos processos temporais de recarga e no comportamento do nível das águas subterrâneas do aquífero Jandaíra, conforme constatada na tendência de crescimento temporal anual das precipitações médias no intervalo entre janeiro/2004 a julho/2009, fato este que permitiu uma reposição mais contínua das reservas renováveis do aquífero Jandaíra, contribuindo para um esgotamento natural mais lento, mesmo que tenha ocorrido rebaixamento devido a exploração por poços.

- JANEIRO/2008 a JULHO/2009:

Entre janeiro/2008 e julho/2009 destaca-se a ocorrência de um evento de recarga semelhante ao ocorrido entre janeiro e julho/2004, com mudança dos níveis das águas subterrâneas para um patamar mais raso (recuperação).

Tomando como base os valores extremos mostrados nas **figuras 9 e 10**, esses variaram desde aproximadamente 32,0 metros de profundidade nos poços PB600/32 e

PB027/81 no ano de janeiro/2008, até posições mais rasas entorno de 4,0 metros nos poços PB027/81 e PB600/32, caracterizando uma amplitude de variação do nível das águas subterrâneas da ordem de 28 metros no intervalo de tempo considerado.

- JULHO/2009 a AGOSTO/2013:

Conforme citado anteriormente, o comportamento das chuvas entre 2003 e 2009 (**Figuras 9e 10**) mostra uma tendência média de crescimento das precipitações pluviométricas médias até 2009, anos este no qual se registrou a maior precipitação registrada do período observado, de 1207,7 mm/ano. Seguiu-se uma tendência de diminuição das chuvas entre 2010 e 2014, cujos totais anuais de 2010, 2012, e 2013 em geral são inferiores aos demais anos da série analisada.

De acordo com os gráficos de evolução temporal dos níveis das águas subterrâneas, constata-se entre “2009 e 2014” uma tendência geral de rebaixamento progressivo dos níveis das águas subterrâneas. Neste caso, em julho/2009 os níveis das águas subterrâneas estavam posicionados de forma mais rasa (entre 4,0 e 6,0 metros), e foram rebaixados para posições mais profundas em julho/2013 (ficando entre 34,0 e 43,0 metros). Obteve-se desta forma uma amplitude máxima de variação do nível das águas subterrâneas da ordem de 39,0 metros, os quais praticamente se posicionaram no patamar mais baixa também registrado em janeiro/2004, praticamente o mesmo observado 20 anos atrás.

Ainda dentro do período citado, mais precisamente entre 2011 e 2012, nota-se uma ligeira recuperação dos níveis de água, mais uma vez influenciada pelo aumento das chuvas em relação ao ano anterior, os níveis variaram de 17 a 19 m (período de menores valores de precipitação) a 13 a 15 m (período de acréscimo de chuvas).

Nota-se que a maior amplitude de variação dos níveis das águas subterrâneas, que foi de 39,0 metros, se deu ao longo dos últimos 4 anos (2009 a 2013), coincidente praticamente com a diminuição das ocorrências de chuvas e aumento das estiagens no período considerado, especialmente a partir de 2010. Portanto, a falta de recarga sazonal do aquífero Jandaíra de forma mais efetiva nesses últimos 4 anos motivou a evolução do rebaixamento dos níveis das águas subterrâneas até alcançar os níveis equivalentes aos observados em janeiro/2004, comprometendo assim as reservas renováveis e explotáveis do sistema.

Portanto, é notória a influência dos anos mais chuvosos nos processos temporais de recarga e no comportamento do nível das águas subterrâneas do aquífero Jandaíra, conforme constatada pelas tendências de crescimento temporal anual das precipitações pluviométricas

médias, especialmente observadas no intervalo entre 2004 e 2009. Isto permitiu uma reposição mais contínua das reservas renováveis do aquífero Jandaíra, e seu esgotamento mais lento e sustentável diante da exploração por poços no intervalo de tempo citado.

Diante disto, os dados revelam que as reservas renováveis podem ser recompostas no momento em que as precipitações pluviométricas voltem a ocorrer de forma mais regular na área. O tempo de recarga para recuperação das reservas renováveis tem variado entre 6 meses e 2 anos.

Os resultados de análises feitas nos poços da região oeste e sul de Baraúna podem elucidar o problema do rebaixamento do nível d'água na região, pois trabalhos anteriores apontavam para uma série de hipóteses causadoras do problema, como: superexploração das águas, intercalação de folhelhos e ineficiência na construção dos poços (SERHID, 2003), porém o que fica mais claro nos dados expostos, é que as secas prolongadas sejam o principal fator condicionante para o rebaixamento acentuado dos níveis d'água.

No entanto, de maneira alguma deve se ignorar o uso descontrolado ou a superexploração das águas e concentração dos poços na região de Baraúna, pois de forma direta, juntamente com a seca, acelera o processo de rebaixamento dos níveis de água nos poços dessa área.

ESTIMATIVA DE RECARGA

Para a análise da estimativa de recarga, foi escolhido o *método de variação de nível d'água* (VNA) por se encaixar no tipo de aquífero estudado e possuir uma rede de monitoramento que permitisse esse tipo de pesquisa. O método foi aplicado na rede de monitoramento utilizada para os estudos da zona de exploração da Mina Mizu.

O método VNA foi escolhido, porque além da facilidade e praticidade na aplicação, passa confiabilidade aos resultados. Mesmo assim, possui suas limitações, como mencionam Healy & Cook (2002) que o uso recomendado da técnica é apenas para aquíferos rasos, devido as flutuações abruptas do nível d'água, o que dificilmente ocorre em aquíferos profundos; e o fato do método não poder ser utilizado quando as taxas de recarga e descarga são equivalentes, pois assim a superfície freática não sofre elevação ou rebaixamento e o método estimaria uma recarga nula.

Para o cálculo da recarga na área da Mina Mizu, foi adotada o valor de 5% para o rendimento específico; o valor de Δh foi calculado usando a metodologia mostrada na **figura**

3; Δt é o período de 1 ano hidrológico, foi adotado o ano de 2008, por ter precipitação representativa da normalidade para a região (870 mm), por ter havido recarga depois de um longo período de seca, além de observações suficientes.

Dentro os poços, os escolhidos foram PB026, PB027, PB052, PB059, PB159 e PB161, por possuírem maior número de observações para o ano escolhido. Desta forma, chegamos aos valores de recarga para cada poço escolhido, como mostra a **tabela 7**.

O que pode-se perceber ao observar os resultados de recarga para a região de Baraúna, é uma ligeira resposta do aumento do nível das águas às chuvas que ocorreram no período. A recarga média dos poços escolhidos para essa análise foi de 541,7 mm e a taxa de recarga média de 62,2%.

Ao comparar as taxas de recargas obtidas neste trabalho com resultados de trabalhos elaborados em aquíferos não cársticos, vemos que esses resultados podem parecer absurdos, porém se deve considerar, o grande período de seca sofrido em anos anteriores, o que levou a uma longa recessão, além disso, os aquíferos cársticos fissurais, assim como o aquífero Jandaíra em seu contexto possuem características que permitem ou favorecem a infiltração rápida ou quase instantânea, pequenos volumes de água podem percolar as fissuras com grande facilidade, podendo variar significativamente em um curto espaço de tempo.

CONCLUSÕES

Compreendendo as dificuldades dos estudos em aquíferos cársticos, os dados adquiridos se mostram suficientes para apresentar resultados satisfatórios e que podem mostrar rumos à pesquisas futuras.

A análise de todo contexto encontrado na região, assim como a dos níveis estáticos possibilita afirmar que não existe apenas um fator determinante para o rebaixamento dos níveis de água do aquífero Jandaíra na região de Baraúna, o que pode se observar é que além de secas prolongadas, há também um crescimento rápido e contínuo de poços perfurados na região, além disso, outro fator que confirma a ideia da superexploração é que o cálculo de recarga mostra um grande poder de recuperação dos níveis de água, característica típica de aquíferos cársticos, confirmada pelo rendimento médio acima de 60%, devido principalmente, às áreas em que as estruturas como fraturas e falhas se apresentam com maior frequência, consequentemente uma área com condutividade e transmissividade maior.

Estes estudos permitem visualizar o problema do rebaixamento dos níveis de água subterrânea na região de Baraúna, deixando claro que a ação antrópica possui relação direta com o problema e que a situação merece atenção de pesquisas posteriores.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Avaliação dos Recursos Hídricos Subterrâneos e Proposição de Modelo de Gestão Compartilhada para os Aquíferos da Chapada do Apodi, entre os Estados do Rio Grande do Norte e Ceará. Relatório Final. Brasília/DF: ANA, 2010.

BOUWER, H. & RICE, R. C. A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. *Water Resources Research*, 12(3), p. 423 — 428, 1976.

CARVALHO, V.E.C., REZENDE, K.S., PAES, B.S.T., BETIM, L.S. & MARQUES, E.A.G. Estimativa da recarga em uma sub-bacia hidrográfica rural através do método da variação do nível d'água (VNA). *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* Vol. 19 n. 1 Jan/Mar, p. 271-280, 2014.

COELHO, V. H. R.; ALMEIDA, C das N.; SILANS, A. M. B. P. Análise da flutuação do nível d'água para estimativa da recarga subterrânea da bacia representativa do Rio Grande do Norte no nordeste brasileiro. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* Vol. 17 n. 2 Abr/Jun, p. 241 — 252, 2012.

GOMES, L. H. Determinação da recarga profunda na bacia-piloto do Ribeirão da Onça em zona de afloramento do sistema aquífero Guarani a partir de balanço hídrico em zona saturada. 2008.167 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2008.

HEALY, R.W.& COOK, P.G. Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*, 10, p. 91 — 109, 2002.

KÖPPEN, W. (1936).- *Grundriss der Klimakunde*. 2Aufl. 388 pp. + 9 tables. Berlin & Leipzig.

KRUSEMAN, G. P. & RIDDER, N. A. Analysis and Evaluation of Pumping Test Data. Second Edition. International Institute for Land Reclamation and Improvement — ILRI. Amsterdam, Holanda. 372 p. 2000.

MANDEL, S. AND SHIFTAN, Z.L., 1981. Groundwater Resources (Water pollution). Academic Press Inc.,U.S. 269 páginas.

MAZIERO, T. A. & WENDLAND, E. Variabilidade espacial da recarga em área urbana. In: RBRH — Revista Brasileira de Recursos Hídricos Vol. 13 n. 3 Jul/Set 2008, p. 35 - 46.

MEDEIROS, A. B. Avaliação hidrogeoquímica e qualidade das águas para irrigação no município de Baraúna- RN. Dissertação (Mestrado em geociências). UFRN. 2006.

MISTRETA, G. O. 1984. Aquífero Jandaíra da Bacia Potiguar. 1984. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1984.

NETO, D. C.; KIANG, C. H. Aplicação do método de flutuação de nível da água para a estimativa de recarga -- Exemplo do aquífero Rio Claro. Águas Subterrâneas, V.22, N.01, P.39--48, 2008.

PAZDRO, Z. (1983). Hydrogeologia Ogólna, W.G. Warszawa, p.575. In: ALVAREZ, R.H.; NIEDZIELSKI, H. (1996). Estimacion de la recarga en la subcuenca Rio de las Avenidas Pachuca Hidalgo México. In: Congresso Latino-Americano de Hidr. Sub., 3, México: ALHSUD, p.35-46.

POEHLS D. J. & SMITH, G. J. Encyclopedic Dictionary of Hydrogeology. Editora Academic Press. 527 p. 2009.

SCANLON, B.R., HEALY, R.W., COOK, P.G. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. Hydrogeology Journal, V.10, n.1, p. 18-29, 2002.

SEMARH-RN. Análise das águas do Aquífero Jandaíra em apoio ao programa água doce no rio grande do norte (PAD/RN). XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. P. 10, 2010.

SILVA, A. B. Capítulo 3.2 – hidrogeologia de meios cársticos. Curso de hidrogeologia de aquíferos cársticos. Núcleo de estudos hidrogeológicos do meio ambiente da UFBA (NEHMA), 39p. 1995.

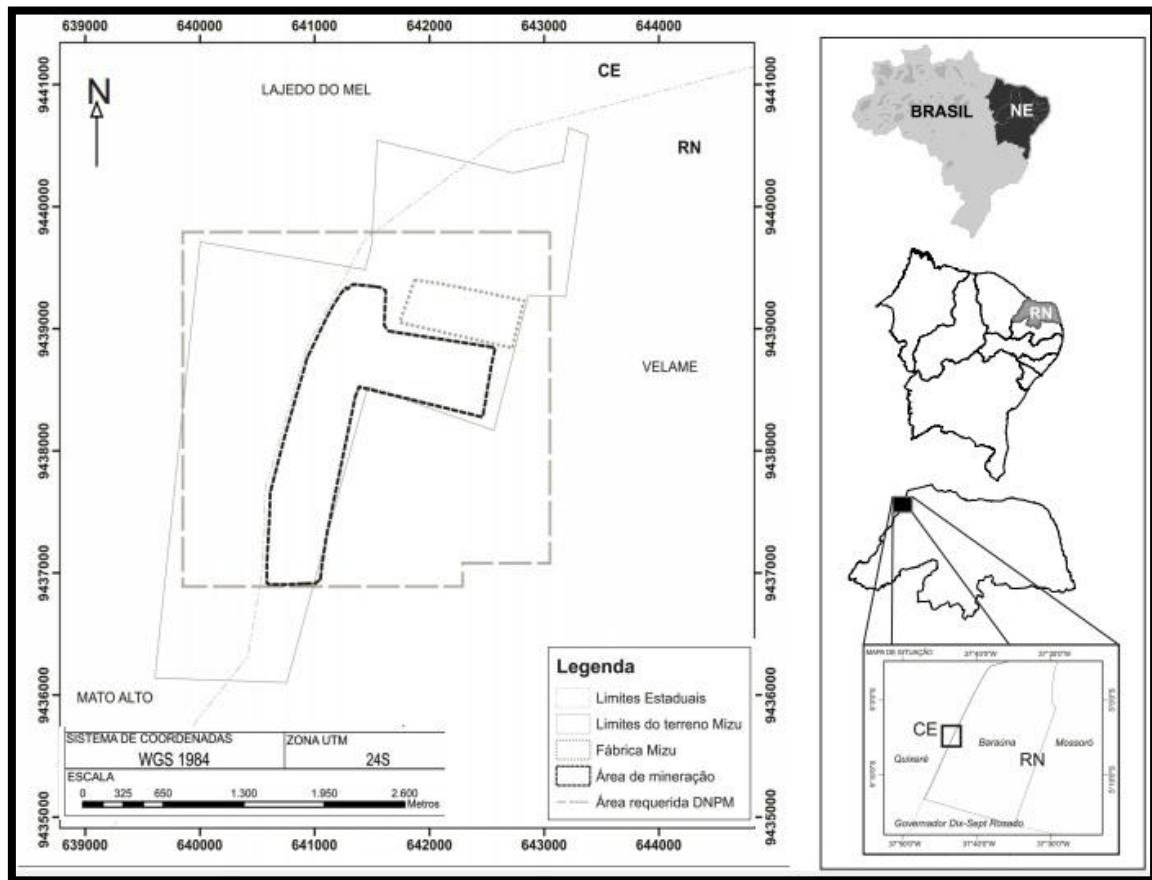


Figura 1: Mapa de localização da área de estudo.

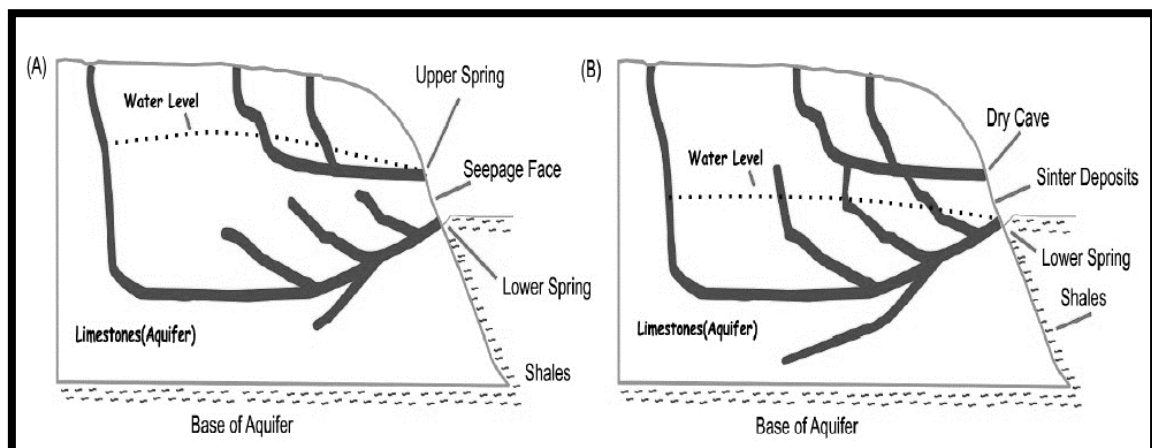


Figura 2: Desenvolvimento do aquífero cárstico pela infiltração de águas superficiais: (A) Estágio inicial; (B) Estágio avançado. (Modificado de Mandel & Shiftan, 1981).

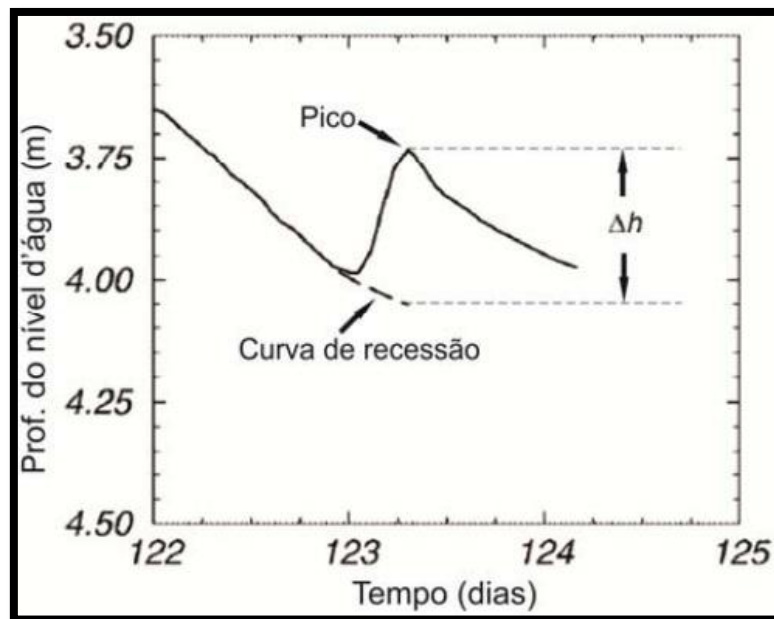


Figura 3: Determinação de Δh . Adaptado de Healy & Cook, 2002.

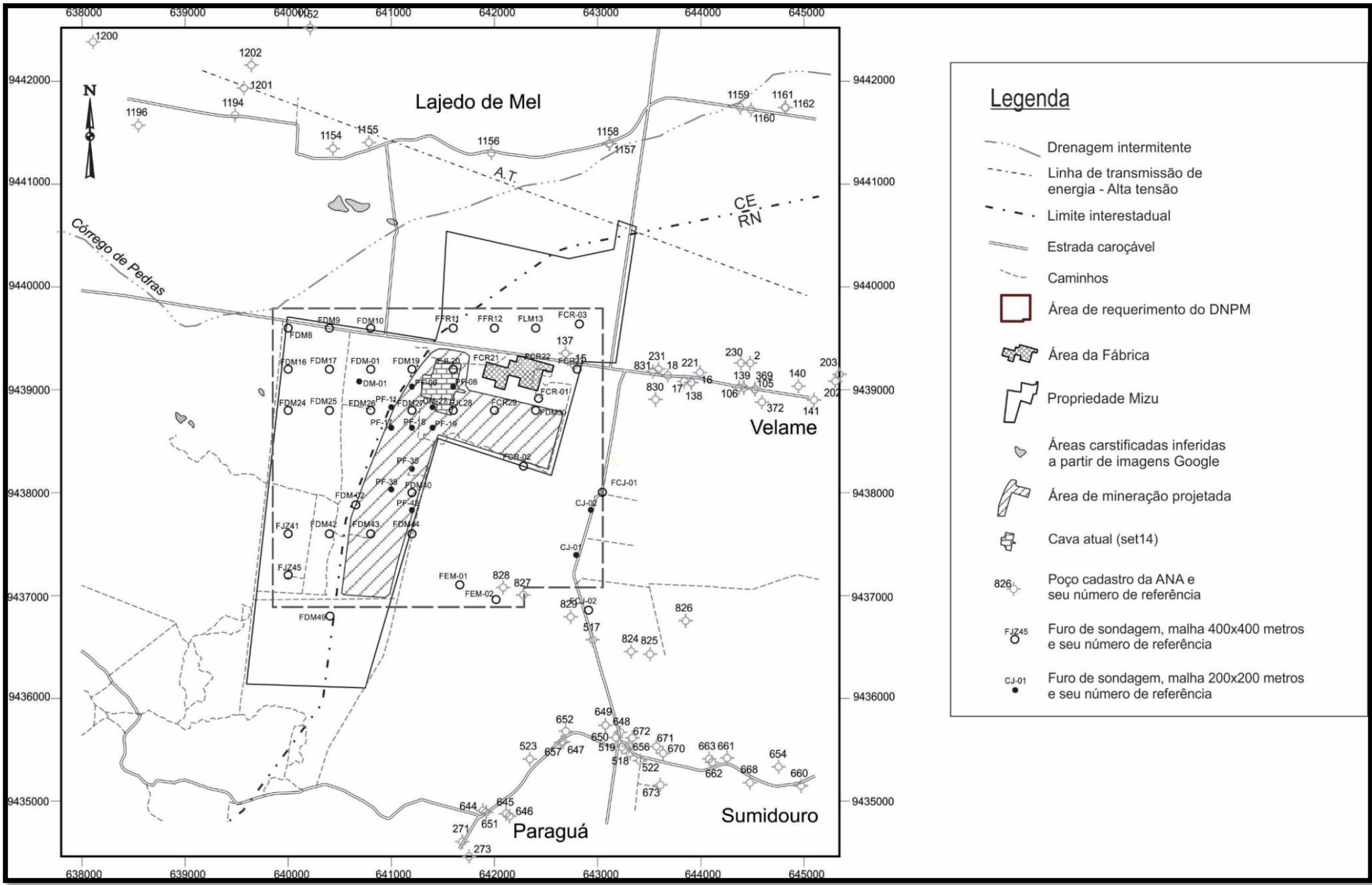


Figura4: Base cartográfica usada para o cadastramento dos poços.

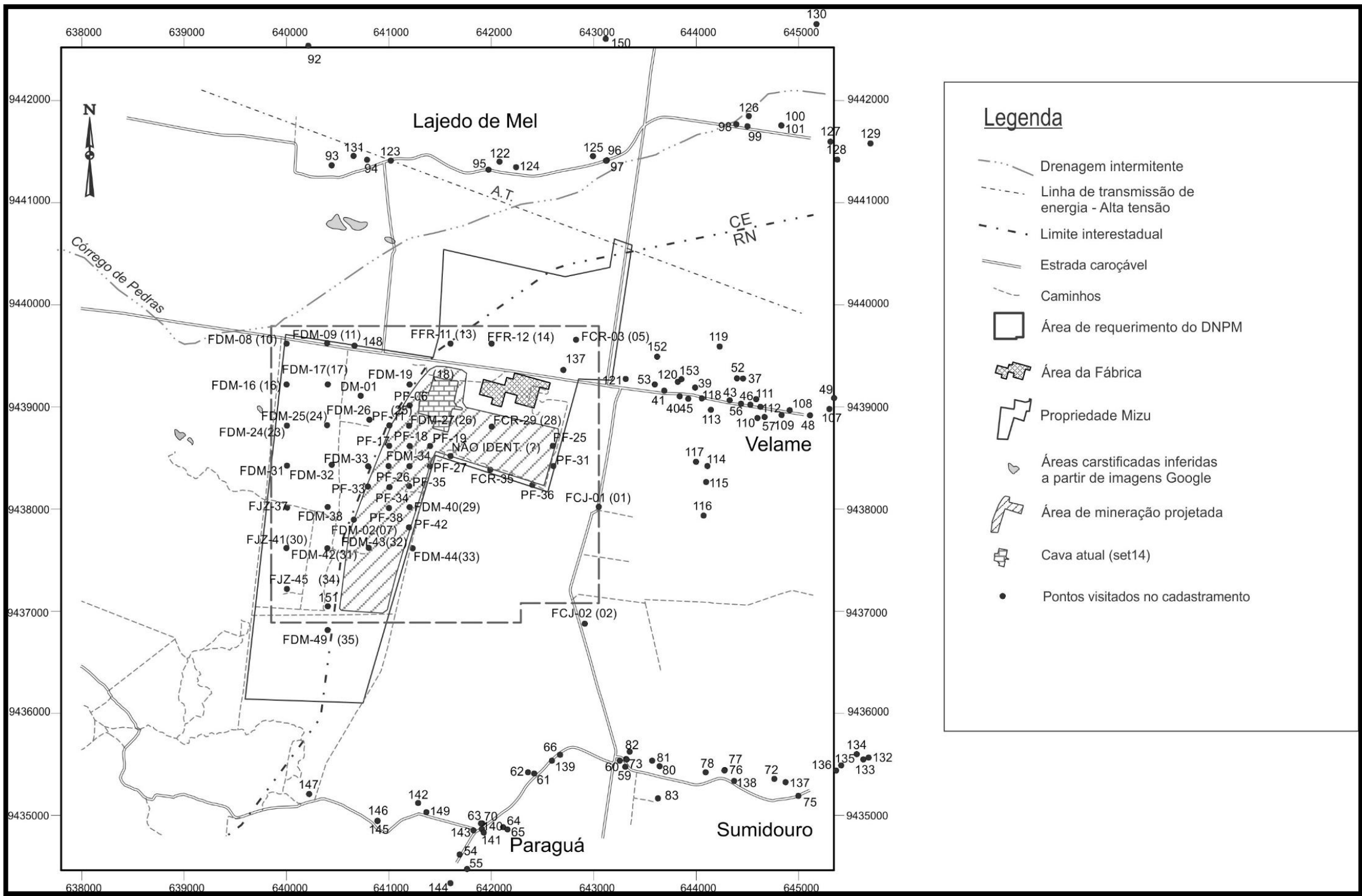


Figura 5: Poços e sondagens cadastrados

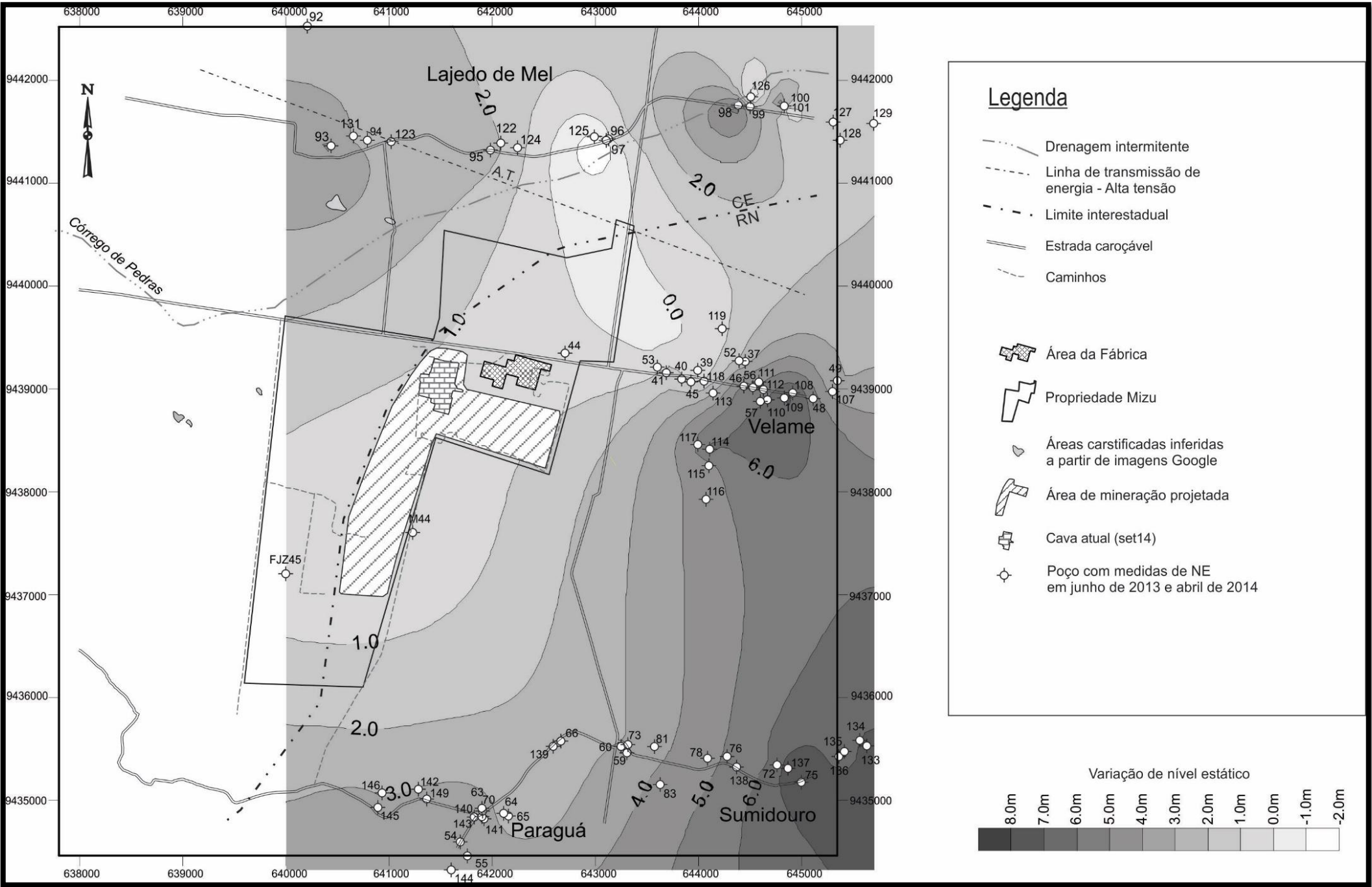


Figura 6: Variação do NE entre junho de 2013 e abril de 2014.

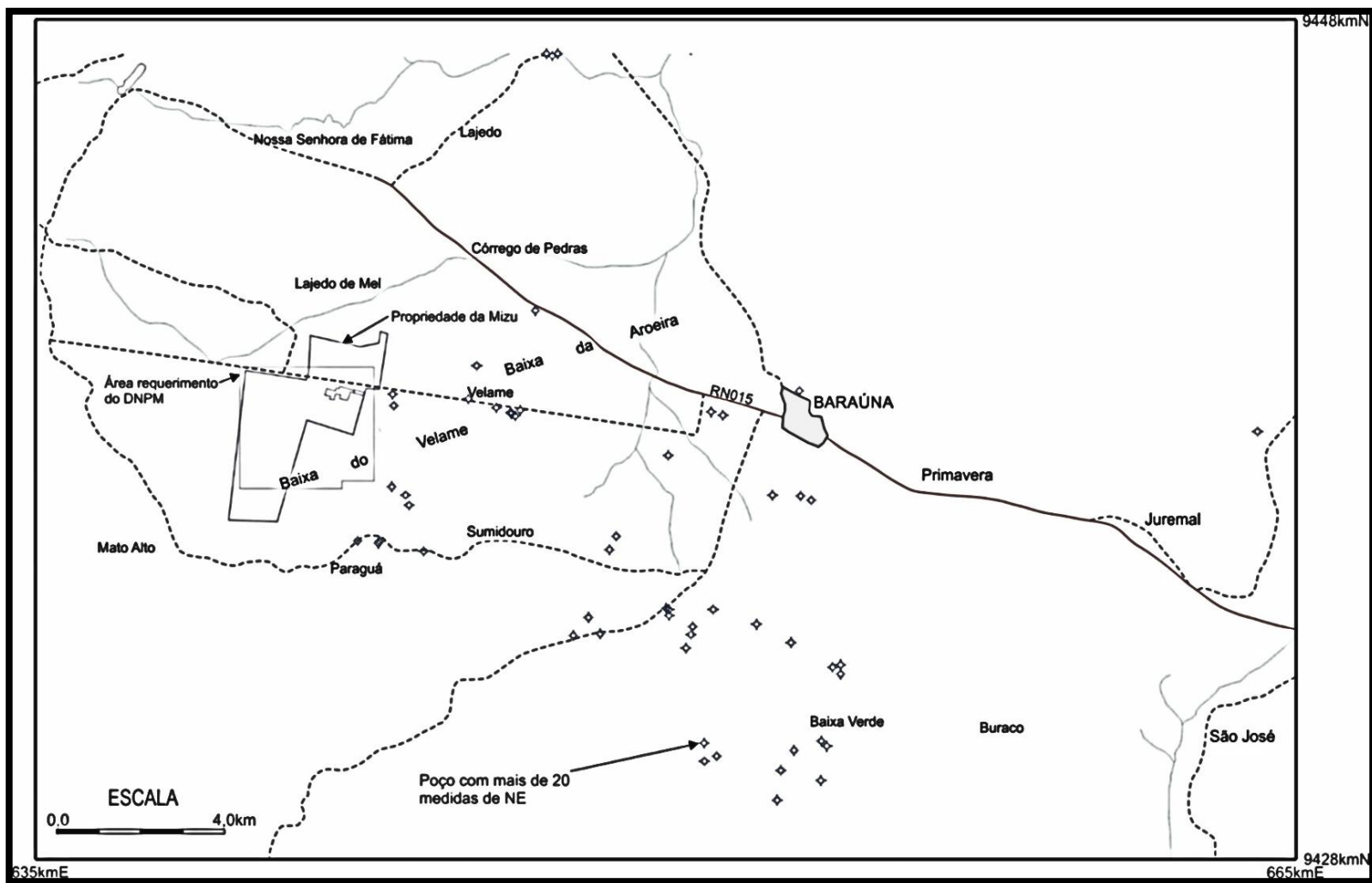


Figura 7: Poços monitorados pela SEMARH com pelo menos 20 medidas de NE.

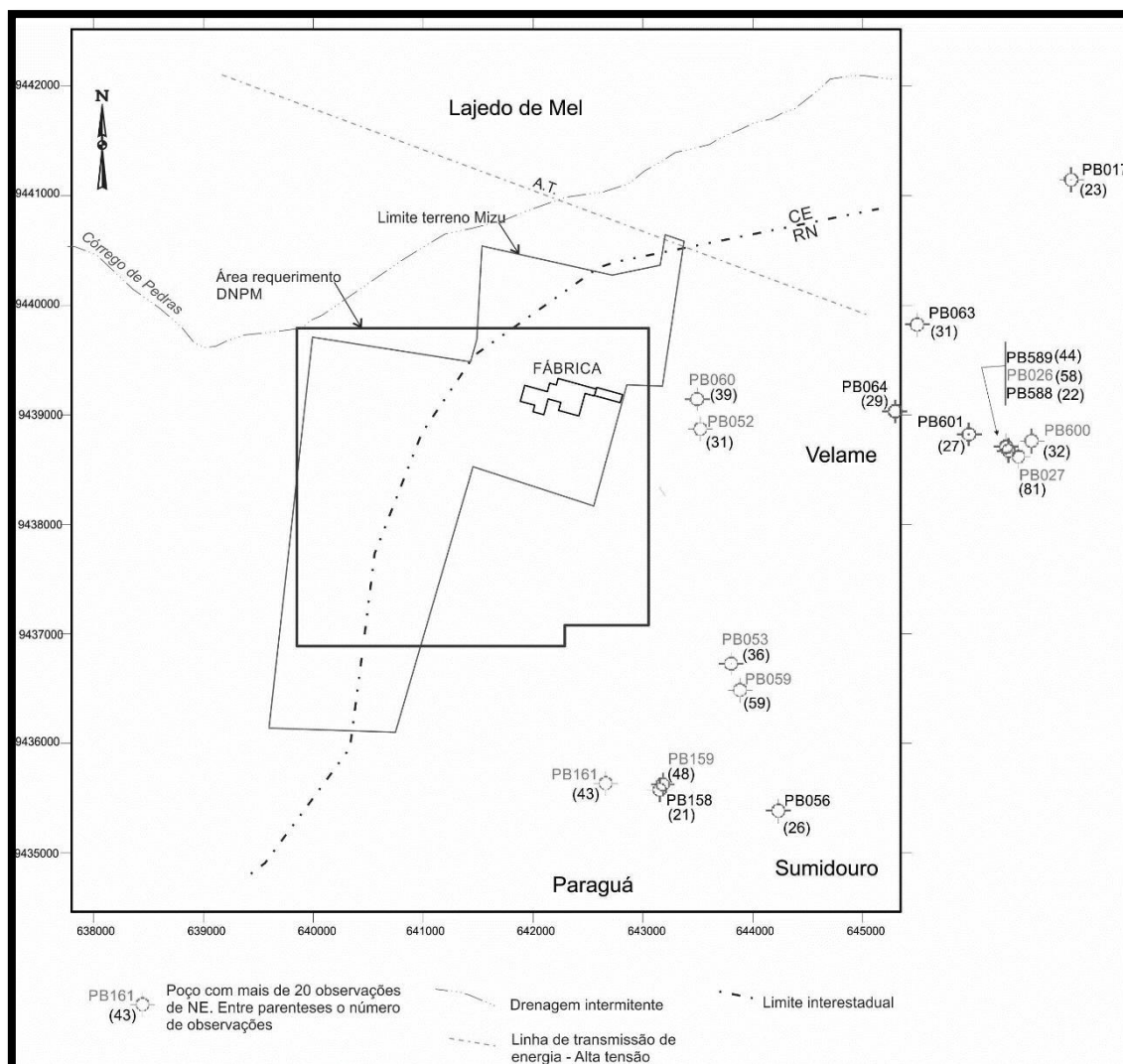


Figura 8: Distribuição dos poços com mais de 20 medidas de NE próximos à Mizu.

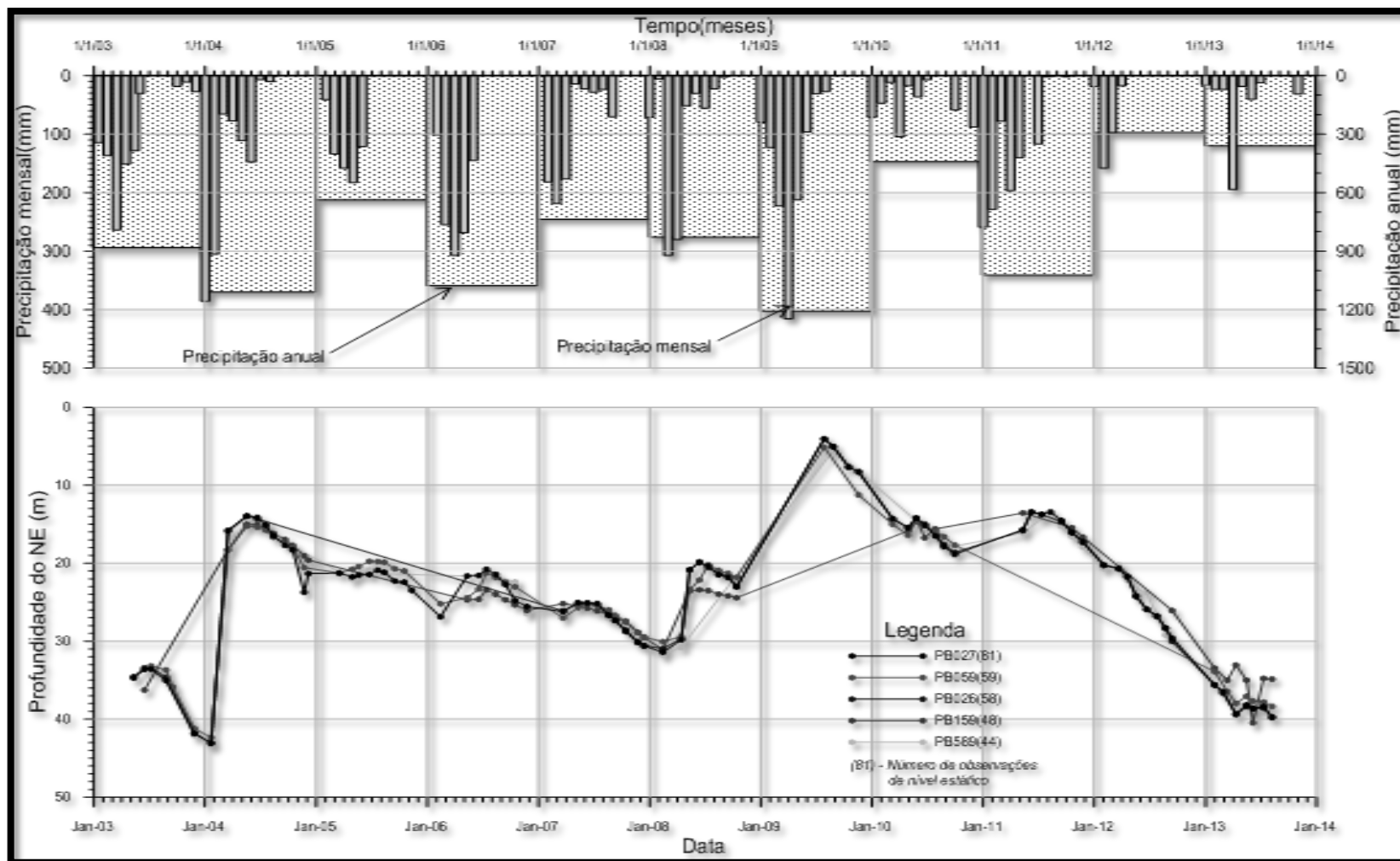


Figura 9: Evolução dos NE em cinco pontos do aquífero Jandaíra e da precipitação em Baraúna no período de 2003 a 2013.

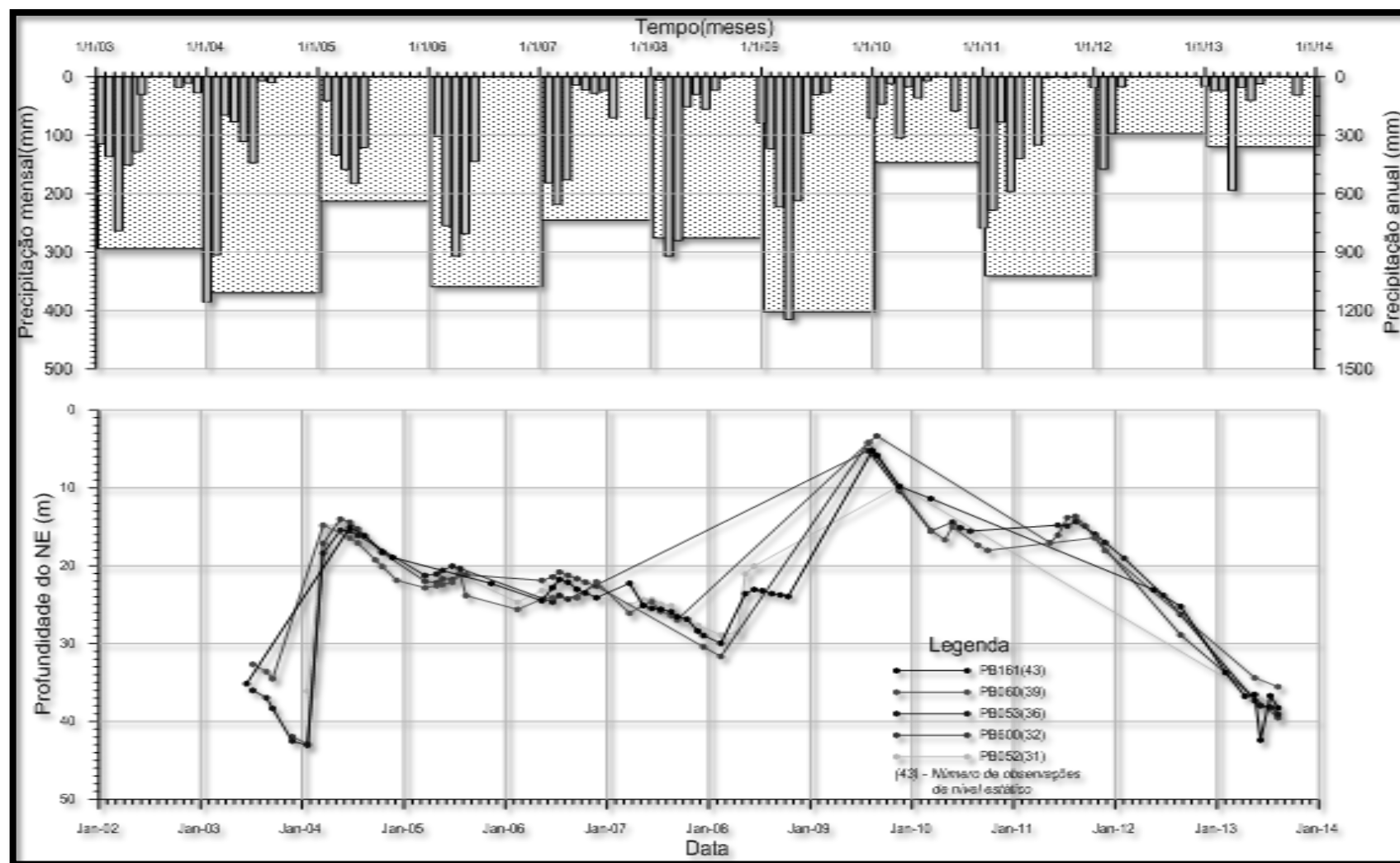


Figura 10: Evolução dos NE em cinco pontos do aquífero Jandaíra e da precipitação em Baraúna no período de 2003 a 2013.

Tabela 1: Usos da água subterrânea

Usos	Qt.	%	% s/ sondagens
Consumo humano	3	1,92	3,19
Fora de operação	22	14,1	23,4
Misto	5	3,21	5,32
Irrigação	52	33,33	55,32
Não definido	12	7,69	12,77
Sondagens	62	39,74	

Tabela 2: Vazões medidas em abril de 2014.

POÇO	LOCAL	UTME(m)	UTMN(m)	Q(m³/h)
114	Comunidade Velame II	644102	9438404	31,55
122	Lajedo de Mel	642074	9441382	10
125	Lajedo de Mel	642986	9441436	11
131	Lajedo de Mel	640650	9441438	10
133	Sumidouro	645623	9435534	39,6
134	Sumidouro	645559	9435586	19,6
135	Sumidouro	645407	9435476	57,5
138	Sumidouro	644363	9435324	11,7
139	Mato Alto	642585	9435522	5,55
142	Paraguá	641280	9435108	68,5
144	Paraguá	641595	9434324	58,5
149	Paraguá	641361	9435018	7,4
98	Córrego de Pedra	644384	9441748	21,6
92	Lajedo de Mel	640209	9442516	2,2
93	Lajedo de Mel	640437	9441346	23,6
49	Comunidade Velame II	645338	9439070	24
54	Paraguá	641685	9434604	34
55	Paraguá	641758	9434462	41,5
63	Paraguá	641893	9434908	33
64	Mato Alto	642109	9434872	54,7
66	Mato Alto	642665	9435580	64,5
81	Mato Alto	643563	9435522	33

Tabela 3: Níveis estáticos medidos em abril de 2014.

Poço	UTME (m)	UTMN (m)	NE (m)	Data	Poço	UTME (m)	UTMN (m)	NE (m)	Data
49	645338	9439070	40,89	01/04/2014	53	643589	9439202	34,87	16/04/2014
107	645292	9438962	34,82	02/04/2014	73	643310	9435538	40,58	17/04/2014
108	644905	9438950	41,86	04/04/2014	59	643301	9435462	40,72	17/04/2014
109	644826	9438904	41,9	05/04/2014	60	643247	9435522	40,32	17/04/2014
110	644660	9438884	41,56	06/04/2014	81	643563	9435522	40,48	15/04/2014
111	644578	9439058	40,96	07/04/2014	83	643620	9435154	38,89	17/04/2014
56	644521	9439004	41,6	08/04/2014	133	645623	9435534	45,28	05/04/2014
57	644591	9438874	42,25	09/04/2014	134	645559	9435586	45,37	05/04/2014
46	644430	9439014	41,79	10/04/2014	75	644990	9435178	42,78	07/04/2014
43	644319	9439048	49,45	11/04/2014	135	645407	9435476	36,09	10/04/2014
112	644620	9438984	41,36	12/04/2014	136	645358	9435426	44,81	19/04/2014
52	644390	9439262	38,41	13/04/2014	72	644755	9435344	44,44	19/04/2014
113	644136	9438954	39,49	15/04/2014	137	644865	9435312	46,14	19/04/2014
114	644102	9438404	43,02	16/04/2014	138	644363	9435324	42,29	07/04/2014
115	644090	9438248	42,37	17/04/2014	76	644271	9435430	42,16	19/04/2014
117	643991	9438446	41,61	15/04/2014	78	644085	9435408	41,39	17/04/2014
118	644048	9439066	37,01	15/04/2014	66	642665	9435580	38,16	11/04/2014
39	643982	9439172	28,66	16/04/2014	139	642585	9435522	37,3	17/04/2014
40	643832	9439086	38,45	16/04/2014	64	642109	9434872	36,05	11/04/2014
41	643681	9439142	36,59	16/04/2014	65	642152	9434850	35,91	12/04/2014
120	643813	9439228	70,2	31/03/2014	140	641902	9434852	37,13	17/04/2014
121	643305	9439256	30,72	19/04/2014	141	641920	9434818	37,12	17/04/2014
95	641967	9441304	21,34	02/04/2014	70	641906	9434908	37	17/04/2014
122	642074	9441382	21,45	02/04/2014	63	641893	9434908	37,08	10/04/2014
96	643122	9441396	22,18	16/04/2014	142	641280	9435108	37,82	10/04/2014
97	643113	9441390	20,8	16/04/2014	143	641820	9434840	37,29	19/04/2014
125	642986	9441436	24,94	02/04/2014	54	641685	9434604	37,86	19/04/2014
98	644384	9441748	35,13	03/04/2014	55	641758	9434462	37,49	12/04/2014
99	644493	9441728	33,65	16/04/2014	144	641595	9434324	37,94	12/04/2014
126	644506	9441828	29	16/04/2014	145	640884	9434932	37,27	17/04/2014
100	644822	9441738	36,21	19/04/2014	146	640927	9435072	36,62	17/04/2014
101	644824	9441736	30,18	16/04/2014	93	640437	9441346	20,57	07/04/2014
127	645302	9441578	33,24	16/04/2014	149	641361	9435018	37,77	11/04/2014
128	645369	9441402	33,73	16/04/2014	92	640209	9442516	20,35	05/04/2014
129	645693	9441560	33,73	16/04/2014	152	643612	9439474	32,55	16/04/2014
131	640650	9441438	19,69	03/04/2014	FJZ45	640000	9437202	16,71	01/05/2014
94	640782	9441400	19,65	16/04/2014	FDM44	641227	9437600	16,97	02/05/2014

Tabela 4: Cálculo da variação do NE (ΔNE) entre junho de 2013 e julho de 2014.

Poço	NE (m)	Data	NE (m)	Data	□ NE (m)	Poço	NE (m)	Data	NE (m)	Data	□ NE (m)
49	37,85	01/06/2013	40,89	01/04/2014	3,04	128	32,31	12/06/2013	33,73	16/04/2014	1,42
107	31,13	02/06/2013	34,82	02/04/2014	3,69	129	31,77	12/06/2013	33,73	16/04/2014	1,96
108	34,8	04/06/2013	41,86	04/04/2014	7,06	131	16,86	12/06/2013	19,69	03/04/2014	2,83
109	34,76	05/06/2013	41,9	05/04/2014	7,14	53	34,64	14/06/2013	34,87	16/04/2014	0,23
110	35,68	06/06/2013	41,56	06/04/2014	5,88	73	37,55	14/06/2013	40,58	17/04/2014	3,03
111	36,2	07/06/2013	40,96	07/04/2014	4,76	59	37,32	14/06/2013	40,72	17/04/2014	3,4
57	36,44	09/06/2013	42,25	09/04/2014	5,81	81	36,86	14/06/2013	40,48	15/04/2014	3,62
46	36,36	10/06/2013	41,79	10/04/2014	5,43	83	34,62	14/06/2013	38,89	17/04/2014	4,27
43	35,92	11/06/2013	49,45	11/04/2014	13,53	133	38,14	14/06/2013	45,28	05/04/2014	7,14
112	36,02	12/06/2013	41,36	12/04/2014	5,34	136	38,09	14/06/2013	44,81	19/04/2014	6,72
52	36,29	13/06/2013	38,41	13/04/2014	2,12	72	38,2	14/06/2013	44,44	19/04/2014	6,24
113	36,42	15/06/2013	39,49	15/04/2014	3,07	137	38,22	14/06/2013	46,14	19/04/2014	7,92
114	36,77	16/06/2013	43,02	16/04/2014	6,25	138	36,95	14/06/2013	42,29	07/04/2014	5,34
115	37,86	17/06/2013	42,37	17/04/2014	4,51	64	33,79	15/06/2013	36,05	11/04/2014	2,26
118	36	11/06/2013	37,01	15/04/2014	1,01	140	33,07	15/06/2013	37,13	17/04/2014	4,06
39	28,67	11/06/2013	28,66	16/04/2014	-0,01	141	33,15	15/06/2013	37,12	17/04/2014	3,97
41	34,76	11/06/2013	36,59	16/04/2014	1,83	70	33,3	15/06/2013	37	17/04/2014	3,7
120	34,81	11/06/2013	70,2	31/03/2014	35,39	63	33,51	15/06/2013	37,08	10/04/2014	3,57
121	42,01	11/06/2013	30,72	19/04/2014	- 11,29	144	34,25	15/06/2013	37,94	12/04/2014	3,69
95	18,88	11/06/2013	21,34	02/04/2014	2,46	145	33,34	15/06/2013	37,27	17/04/2014	3,93
97	22,92	11/06/2013	20,8	16/04/2014	-2,12	146	33,87	15/06/2013	36,62	17/04/2014	2,75
98	29,65	12/06/2013	35,13	03/04/2014	5,48	93	16,45	17/06/2013	20,57	07/04/2014	4,12
99	30,8	12/06/2013	33,65	16/04/2014	2,85	92	18,05	17/06/2013	20,35	05/04/2014	2,3
126	30,44	12/06/2013	29	16/04/2014	-1,44	152	53,9	20/06/2013	32,55	16/04/2014	- 21,35
100	30,87	12/06/2013	36,21	19/04/2014	5,34	FJZ45	16,3	18/06/2013	16,71	01/05/2014	0,4
101	29,86	12/06/2013	30,18	16/04/2014	0,32	FDM44	16,83	20/06/2013	16,97	02/05/2014	0,14
127	31,54	12/06/2013	33,24	16/04/2014	1,7						

Obs.: Valores marcados em negrito são considerados anômalos.

Tabela 5: Valores de condutividade hidráulica do aquífero Jandaíra.

Poço	Condutividade hidráulica (m/s)	
	Bouwer-Rice	Hvorslev
Pb-02	$1,17 \times 10^{-8}$	$1,58 \times 10^{-8}$
Pb-03	$3,00 \times 10^{-8}$	$3,20 \times 10^{-8}$
Pb-04	$1,63 \times 10^{-8}$	$2,13 \times 10^{-8}$
Pb-05	$1,13 \times 10^{-7}$	$1,43 \times 10^{-7}$
Média	$4,28 \times 10^{-8}$	$1,43 \times 10^{-8}$

Tabela 6: Frequências das medidas de nível estático.

Li	Ls	FO	FR(%)
0	10	46	34,3
10	20	34	25,4
20	30	22	16,4
30	40	12	9
40	50	8	6
50	60	8	6
60	70	3	2,2
70	82	1	0,7

Obs.: Li= Limite inferior de classe; Ls= Limite superior de classe; FO= Frequência observada; FR= Frequência observada relativa

Tabela 7: Cálculo de Δh , recarga e taxa de recarga para seis poços no ano de 2008.

Poço	h1	h2	Δh (m)	R (mm)	r (%)
PB026	32	19	13	650	74,7
PB027	32	19	13	650	74,7
PB052	29	20	9	450	51,7
PB059	32	19	13	650	74,7
PB159	32	22	10	500	57,5
PB161	30	23	7	350	40,2

Sendo r: taxa de recarga