



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

IDEMBERGUE BARROSO MACEDO DE MOURA

**ESTUDOS DAS ÁGUAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO BANABUIÚ
NO TRECHO ENTRE QUIXERAMOBIM E BANABUIÚ – CEARÁ, BRASIL**

FORTALEZA

2013

IDEMBERGUE BARROSO MACEDO DE MOURA

ESTUDOS DAS ÁGUAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO BANABUIÚ
NO TRECHO ENTRE QUIXERAMOBIM E BANABUIÚ – CEARÁ, BRASIL

Tese submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Geologia, da Universidade Federal do Ceará, como requisito necessário para obtenção do grau de Doutor em Geologia.

Área de concentração: Hidrogeologia e Gestão Hidroambiental.

Orientador: Prof. Dr. Horst Frischkorn
Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Diolande Ferreira Gomes

FORTALEZA

2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Ciências e Tecnologia

M886e Moura, Idembergue Barroso Macedo de.
Estudos das águas da bacia hidrográfica do rio Banabuiú no trecho entre Quixeramobim e Banabuiú – Ceará, Brasil. / Idembergue Barroso Macedo de Moura. – 2013.
242 f. : il. color, enc. ; 30 cm.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Departamento de Geologia, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Fortaleza, 2013.

Área de concentração: Hidrologia e Gestão Hidroambiental.

Orientação: Prof. Dr. Horst Frischkorn.

Coorientação: Profa. Dra. Diolande Ferreira Gomes.

1. Bacias hidrográficas – Ceará. 2. Hidrografia – Ceará. 3. Rios – Ceará. I. Título.

IDEMBERGUE BARROSO MACEDO DE MOURA

ESTUDOS DAS ÁGUAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO BANABUIÚ
NO TRECHO ENTRE QUIXERAMOBIM E BANABUIÚ – CEARÁ, BRASIL

Tese submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Geologia, da Universidade Federal do Ceará, como requisito necessário para obtenção do grau de Doutor em Geologia. Área de concentração: Hidrogeologia e Gestão Hidroambiental.

Aprovada em ___ / ___ / ____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Horst Frischkorn (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Gerson Cardoso da Silva Júnior
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Prof. Dr. Itabaraci Nazareno Cavalcante
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Luiz Alberto Ribeiro Mendonça
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof^a. Dr^a. Sônia Maria Silva Vasconcelos
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico esta Tese a Papai do Céu, aos meus pais, Francisco Idilberto e Maria Eulina, ao meu grande irmão Idilberto, a minha grande e amada esposa Dayana Cristina e a todos os meus amigos que me ajudaram a realizar meus objetivos.

AGRADECIMENTOS

A Deus e a Nossa Senhora, pela força e determinação concedida para realização de mais um sonho.

Aos meus pais Francisco Idilberto e Maria Eulina, pelo amor, por sempre me apoiarem na vitória ou na derrota e por terem lutado para me dar a chance que não tiveram.

À minha esposa Dayana Cristina, por sua paciência, sinceridade, carinho, amor e ajuda em todo este tempo.

Ao meu irmão Idilberto (Betinho), por ter me dado forças e me ajudado nas diversas vezes que precisei, principalmente acompanhando os trabalhos de campo.

Ao meu padrinho e amigo Samuel, por toda cultura me passada até hoje; ao meu tio Dimas, por sempre acreditar que eu seria capaz e por seu exemplo de vida vencedor; e ao meu primo Sergio, por sempre acreditar e me ensinar como trilhar um caminho vencedor.

Aos meus amigos e orientadores Prof. Dr. Horst Frischkorn e Prof^a. Dr^a. Diolande Ferreira Gomes, pelos ensinamentos e todas as batalhas que travamos juntos, confiança, amizade, apoio, incentivo e discussões que muito me fizeram aprender. Certamente grandes pessoas e exemplos de vida, muito obrigado por tudo.

Ao amigo e Prof. Dr. George Satander Sá Freire por toda força e apoio durante minha jornada estudantil.

Aos amigos Prof. Dr. Itabaraci Nazareno Cavalcante e Prof^a. Dr^a. Sônia Maria Silva Vasconcelos por todas as dúvidas tiradas no decorrer desta longa caminhada, que mesmo sempre ocupados arranjaram tempo para o esclarecimento de dúvidas.

Aos Professores Dr. Gerson Cardoso da Silva Júnior e Dr. Luiz Alberto Ribeiro Mendonça por participarem da Banca de Doutorado oferecendo sugestões de grande importância.

Ao Prof. Dr. José Nogueira de Araújo Neto, Coordenador da Pós-graduação em Geologia, por sempre arranjar tempo para tirar dúvidas sobre o curso de pós-graduação e por sempre apoiar e incentivar minha pesquisa.

Aos professores e colegas do Curso de Pós-Graduação em Geologia da UFC.

Aos professores, amigos e colegas, e a todos os integrantes do Laboratório de Geologia Marinha e Aplicada e Laboratório de Geoquímica Ambiental.

Ao Laboratório de Ecologia Isotópica CENA/USP-Piracicaba-SP, na pessoa de Dr. Plínio Barbosa, pelas medidas de oxigênio-18 e Deutério.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), que me concedeu bolsa de doutorado para realização da pesquisa e apoio financeiro através da aprovação do Projeto pelo edital CNPq N° 014/2011– Universal.

À Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH), na pessoa de MsC. Quesado Junior, pelo fornecimento dos dados hidrológicos.

À FUNCEME e ao INPE pelo fornecimento de dados dos postos de coleta de dados de Quixeramobim, Morada Nova e Banabuiú.

À Universidade Federal do Ceará (UFC), pela estrutura de ensino que me proporcionou a caminhada até aqui.

Ao Sr. José Euber e amigos da AMPLA Engenharia, por sempre terem incentivado e apoiado meu doutorado.

Aos meus amigos Glória, Eduardo, Andrea, Rennan, Thaiany, Tony, Ludmila, Elisângela, Fabrícia, Luís Carlos, Cláudia, Aleson, Josué, Cássio, Alex, Evilarde, Alexandre, Lilian, Gil, Afonso, Antonio, Alcina, Daniela (*in memoriam*), João Thiago, Camila, Vlândia, Zelândia, Luciana, Cacá, Adriana, Júlio César, Waldemar, Jefer, Jennyfer e Sthefany pelos momentos de descontração que me deram forças para continuar meus estudos.

Aos moradores e donos dos poços, por sempre nos receber em suas residências com alegria e nos deixar fazer as coletas.

Aos meus grandes amigos Inácio, Carlos Márcio e Edílson que foram de fundamental importância para os trabalhos desenvolvidos.

E finalmente a todas aquelas pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para o desenvolvimento deste trabalho.

“MUITO OBRIGADO A TODOS!!!”

“Nenhuma mente que se abre para uma nova
idéia, voltará a ter o tamanho original.”

(Albert Einstein)

RESUMO

A área deste estudo de hidrogeologia abrange a Bacia do Banabuiú, trecho entre Quixeramobim e Banabuiú, e está localizada às margens dos rios Quixeramobim e Banabuiú. É necessário para os usuários e gestores conhecer os aspectos qualitativos e quantitativos das águas usadas e a interação entre as águas dos rios Quixeramobim e Banabuiú com os aquíferos aluvionares. O objetivo deste estudo foi aprofundar os conhecimentos sobre a hidrogeologia dos aluviões em relação às reservas, qualidade e hidrodinâmica das águas. Para isto, realizou-se o cadastro de poços, monitoramento das variações dos níveis estáticos, levantamento planialtimétrico, levantamento geofísico por resistividade, medidas de parâmetros físico-químicos, biológicos, metais pesados, análises isotópicas (^{18}O e D) nas águas da chuva, dos poços, dos rios Banabuiú e Quixeramobim, e do açude Banabuiú. A estimativa das reservas dos aquíferos aluvionares também foi realizada. No tratamento e interpretação dos dados usou-se o diagrama de *Piper*, diagrama USSL, Ato e Resist, para interpretação das SEVs, programa Surfer 8.0 para simulação do fluxo subterrâneo, e padrões de potabilidade da portaria N° 2914/2011 do Ministério da Saúde. Verificou-se que o fluxo subterrâneo dirige-se na mesma direção dos rios Quixeramobim e Banabuiú, ou seja, em direção ao Leste. O aquífero aluvionar apresenta uma espessura média da ordem de 7,08 m. A recarga dos aluviões no trecho entre Quixeramobim e Banabuiú foi de $6,09 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ano}$ e a reserva permanente é de aproximadamente $34,8 \times 10^6 \text{ m}^3$. Os principais problemas para o consumo humano das águas (superficiais e subterrâneas) são os coliformes totais, o elemento ferro, a elevada salinidade, o nitrato, o manganês e o alumínio, estes se encontram com valores acima do permitido pela Portaria n° 2914 do Ministério da Saúde. Portanto, estas águas só podem ser consumidas após o devido tratamento. Para o uso na irrigação, as águas superficiais e dos aluviões podem ser utilizadas sem muitos problemas, já a água do domínio hidrogeológico cristalino, requer uma prática de irrigação controlada. A reta meteórica local dos isótopos estáveis para o período estudado foi muito semelhante à GMWL. Os aquíferos aluvionares recebem alimentação pelos rios Quixeramobim e Banabuiú. As águas dos poços do domínio hidrogeológico cristalino sofreram recarga apenas por águas meteóricas. As águas dos poços do aquífero aluvionar sugerem que sofreram evaporação durante a recarga. Finalmente, ocorre uma estratificação (térmica e química) no período chuvoso e uma desestratificação no período de estiagem.

Palavras-chave: Aluvião. Rio. Açude. Banabuiú. Quixeramobim. Hidroquímica. Oxigênio-18. Superfície Potenciométrica. Estratificação.

ABSTRACT

The area of this hydrogeological study covers the Banabuiú Basin, in the stretch between Quixeramobim and Banabuiú, and is located on the banks of rivers Quixeramobim and Banabuiú. It is necessary for users and water managers to be aware of the qualitative and quantitative aspects of the water and the interaction between the rivers Quixeramobim and Banabuiú and the alluvial aquifers. For these reasons, we sought to deepen the knowledge about the hydrogeology of the alluvial deposits with respect to reserves, hydrodynamics and water quality. Methods included a data bank of wells, monitoring of changes in static levels, a planialtimetric survey, a geophysical survey by electric resistivity, measurements of physico-chemical and biological parameters, heavy metals, stable isotope analyses (^{18}O and D) in rain, waters from wells, rivers Banabuiú and Quixeramobim, and Banabuiú dam. An estimation of reserves of alluvial aquifers was also made. In the treatment and interpretation of the data Piper and USSL diagrams were used as well as, Ato and Resist for interpretation of VES, program Surfer 8.0 for simulation of groundwater flow; potability standards of Portaria N°. 2914/2011 of the Ministry of Health were used to judge water quality. Results indicate that the groundwater flow has in the same direction of rivers Quixeramobim and Banabuiú, ie eastward. The alluvial aquifer has an average thickness of approximately 7.1 m. The recharge to the alluvium in the stretch between Quixeramobim and Banabuiú was of $6.09 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ and permanent reserve is of approximately $34.8 \times 10^6 \text{ m}^3$. The main problems for human consumption of the waters (surface and groundwater) are total coliforms, the element iron, high salinity, nitrate, manganese and aluminum; these present values higher than permitted by Portaria N° 2914. Therefore, these waters can only be consumed after proper treatment. In irrigation, surface water and alluvium can be used without many problems; however, waters from the crystalline domain require a practice of controlled irrigation. The stable isotope local meteoric water line for the period studied showed a slope very similar to the GMWL. The alluvial aquifers receive recharge from rivers Quixeramobim and Banabuiú. Wells in the crystalline bedrock receive recharge by rainwater. The waters of the alluvial aquifer wells suggest that they suffered evaporation while recharging. Finally, there is a slight stratification in Banabuiú dam (thermal and chemical) in the rainy season that disappears in the dry season.

Keywords: Alluvium. River. Dam. Banabuiú. Quixeramobim. Hydrochemistry. Oxygen-18. Potentiometric surface. Stratification.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Mapa de localização da área estudada.....	33
Figura 02 – Mapa dos solos (pedológico) no trecho entre Quixeramobim e Banabuiú – Ceará.....	48
Figura 03 – Mapa Geomorfológico no trecho entre Quixeramobim e Banabuiú – Ceará.....	51
Figura 04 – Mapa Litológico no trecho entre Quixeramobim e Banabuiú – Ceará.....	55
Figura 05 – Mapa das águas superficiais da Bacia Hidrográfica do Rio Banabuiú – Ceará.	58
Figura 06 – Mapa de localização dos pontos de amostragem.....	63
Figura 07 – Ilustração da lei de Ohm.....	66
Figura 08 – Arranjo Schlumberger.....	67
Figura 09 – Desenvolvimento de campo das SEVs.....	68
Figura 10 – Diagrama de Piper.....	78
Figura 11 – Diagrama para classificação das águas de irrigação segundo o Laboratório de Salinidade dos Estados Unidos - USSL.....	79
Figura 12 – Coletor de água da chuva.....	86
Figura 13 – Mapa de localização da torre no açude Banabuiú (Arrojado Lisboa) – Ceará...	90
Figura 14 – Mapa da superfície potenciométrica do terreno, com as linhas de fluxo do período de chuva, referente aos aquíferos aluvionares da região de Banabuiú..	93
Figura 15 – Mapa da superfície potenciométrica do terreno, com as linhas de fluxo do período de estiagem, referente aos aquíferos aluvionares da região de Banabuiú.....	94
Figura 16 – Mapa geológico da área com a localização dos pontos de levantamento geométrico (SEVs).....	97
Figura 17 – Diagrama de <i>Piper</i> para as águas superficiais (açude Banabuiú, rio Banabuiú e rio Quixeramobim), com amostragens de julho/2010 a abril/2012.....	109
Figura 18 – Diagrama de <i>Piper</i> para as águas superficiais (açude Banabuiú, rio Banabuiú e rio Quixeramobim), com a média de todas as amostragens.....	110
Figura 19 – Classificação das águas superficiais para fins de irrigação, segundo o diagrama do USSL, com amostragens de julho de 2010 a janeiro de 2012.....	126

Figura 20 – Diagrama de <i>Piper</i> para as águas do domínio hidrogeológico cristalino, com amostragens de julho/2010 a abril/2012.....	131
Figura 21 – Diagrama de <i>Piper</i> para as águas do domínio hidrogeológico cristalino, com a média de todas as amostragens.....	131
Figura 22 – Classificação das águas do domínio hidrogeológico cristalino para fins de irrigação, segundo o diagrama do USSSL, com amostragens de julho de 2010 a janeiro de 2012.....	142
Figura 23 – Distribuição espacial da condutividade elétrica ($\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$) das águas dos poços dos aluviões e do domínio hidrogeológico cristalino, rios Quixeramobim e Banabuiú, e açude Banabuiú.....	148
Figura 24 – Diagrama de <i>Piper</i> para as águas dos aquíferos aluvionares, com amostragens de julho de 2010 a janeiro de 2012.....	149
Figura 25 – Diagrama de <i>Piper</i> para as águas dos aquíferos aluvionares, com a média de todas as amostragens.....	150
Figura 26 – Classificação das águas dos aquíferos aluvionares para fins de irrigação, segundo o diagrama do USSSL, com amostragens de julho de 2010 a janeiro de 2012.....	159

LISTA DE TABELAS

Tabela 01	– Coordenadas dos vértices envolvente da área de estudo.....	32
Tabela 02	– Nomenclatura dos pontos de amostragem utilizada neste estudo.....	32
Tabela 03	– Precipitação pluviométrica média do período de 1988 a 2012 no município de Banabuiú.....	35
Tabela 04	– Temperatura média do período de 2009 a 2012 no município de Banabuiú.	37
Tabela 05	– Evapotranspiração potencial média mensal calculada segundo a fórmula de Thornthwaite (1948) para o período de 2009 a 2012.....	39
Tabela 06	– Pressão Atmosférica (médias mensais e anuais) do período de 2009 a 2012 no município de Banabuiú.....	40
Tabela 07	– Umidade Relativa do Ar (médias mensais e anuais) do período de 2009 a 2012 no município de Banabuiú.....	42
Tabela 08	– Velocidade média dos ventos ($m.s^{-1}$) na Bacia Hidrográfica do Rio Banabuiú.....	44
Tabela 09	– Direção do vento (médias mensais e anuais) do período de 2009 a 2012 no município de Banabuiú.....	45
Tabela 10	– Pontos de amostragem.....	62
Tabela 11	– Níveis estáticos em metros, em dois ciclos hidrológicos (julho/2010 até abril/2012).....	91
Tabela 12	– Cota altimétrica, nível estático médio e carga hidráulica dos pontos de observação.....	92
Tabela 13	– Profundidades e resistividades médias das SEVs.....	98
Tabela 14	– Cálculo do balanço hídrico realizado para a região estudada (com dados meteorológicos de 1988 a 2012).....	101
Tabela 15	– Cálculo do balanço hídrico realizado para a região estudada no ano de 2009.	102
Tabela 16	– pH das águas superficiais (açude Banabuiú, rio Banabuiú e rio Quixeramobim) no período de coleta.....	106
Tabela 17	– Condutividade elétrica em $\mu S/cm$ das águas superficiais (açude Banabuiú, rio Banabuiú e rio Quixeramobim) no período de coleta.....	107
Tabela 18	– Relações de abundância dos cátions das águas superficiais (açude Banabuiú, rio Banabuiú e rio Quixeramobim).....	110

Tabela 19	– Relações de abundância dos ânions das águas superficiais (açude Banabuiú, rio Banabuiú e rio Quixeramobim).....	111
Tabela 20	– Parâmetros do IQA para as águas do açude Banabuiú, rio Banabuiú e rio Quixeramobim, período chuvoso (abril de 2011).....	111
Tabela 21	– Parâmetros do IQA para as águas do açude Banabuiú, rio Banabuiú e rio Quixeramobim, período de estiagem (outubro de 2011).....	112
Tabela 22	– Coliformes Totais para as águas do açude Banabuiú, rio Banabuiú e rio Quixeramobim.....	113
Tabela 23	– Classificação do IQA, média entre abril e outubro de 2011 para as águas do açude Banabuiú, rio Banabuiú e rio Quixeramobim.....	117
Tabela 24	– Concentração de Nitrogênio Amoniacal das águas superficiais.....	118
Tabela 25	– Concentração de Cálcio das águas superficiais.....	118
Tabela 26	– Concentração de Ferro das águas superficiais.....	118
Tabela 27	– Concentração de Magnésio das águas superficiais.....	119
Tabela 28	– Concentração de Sódio das águas superficiais.....	119
Tabela 29	– Concentração de Potássio das águas superficiais.....	119
Tabela 30	– Concentração de Bicarbonato das águas superficiais.....	120
Tabela 31	– Concentração de Cloreto das águas superficiais.....	120
Tabela 32	– Concentração de Fluoreto das águas superficiais.....	120
Tabela 33	– Concentração de Ortofosfato das águas superficiais.....	121
Tabela 34	– Concentração de Nitrato das águas superficiais.....	121
Tabela 35	– Concentração de Nitrito das águas superficiais.....	121
Tabela 36	– Concentração de Sulfato das águas superficiais.....	122
Tabela 37	– Concentração de Sílica das águas superficiais.....	122
Tabela 38	– Concentração de Nitrogênio Amoniacal das águas superficiais.....	122
Tabela 39	– Concentração de Nitrogênio Amoniacal das águas superficiais.....	123
Tabela 40	– Potabilidade das águas superficiais (açude Banabuiú, rio Banabuiú e rio Quixeramobim), de acordo com a Portaria nº 2914 do Ministério da Saúde...	124
Tabela 41	– Concentração de STD médio das águas superficiais (açude Banabuiú, rio Banabuiú e rio Quixeramobim).....	127
Tabela 42	– Classes de água para fins de irrigação dos açude Banabuiú, e rios Banabuiú e Quixeramobim durante todas as etapas de campo (outubro/2010 a abril/2012).....	127

Tabela 43	– pH das águas do domínio hidrogeológico cristalino no período de coleta.....	129
Tabela 44	– Condutividade elétrica das águas dos poços do domínio hidrogeológico cristalino em $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	130
Tabela 45	– Relações de abundância dos cátions das águas do domínio hidrogeológico cristalino.....	132
Tabela 46	– Relações de abundância dos ânions das águas do domínio hidrogeológico cristalino.....	133
Tabela 47	– Concentração de Nitrogênio Amoniacal do domínio hidrogeológico cristalino.....	133
Tabela 48	– Concentração de Cálcio do domínio hidrogeológico cristalino.....	134
Tabela 49	– Concentração de Ferro do domínio hidrogeológico cristalino.....	134
Tabela 50	– Concentração de Magnésio do domínio hidrogeológico cristalino.....	134
Tabela 51	– Concentração de Sódio do domínio hidrogeológico cristalino.....	135
Tabela 52	– Concentração de Potássio do domínio hidrogeológico cristalino.....	135
Tabela 53	– Concentração de Bicarbonato do domínio hidrogeológico cristalino.....	135
Tabela 54	– Concentração de Cloreto do domínio hidrogeológico cristalino.....	136
Tabela 55	– Concentração de Fluoreto do domínio hidrogeológico cristalino.....	136
Tabela 56	– Concentração de Ortofosfato do domínio hidrogeológico cristalino.....	136
Tabela 57	– Concentração de Nitrato do domínio hidrogeológico cristalino.....	137
Tabela 58	– Concentração de Nitrito do domínio hidrogeológico cristalino.....	137
Tabela 59	– Concentração de Sulfato do domínio hidrogeológico cristalino.....	137
Tabela 60	– Concentração de Sílica do domínio hidrogeológico cristalino.....	138
Tabela 61	– Concentração de Alcalinidade Total do domínio hidrogeológico cristalino...	138
Tabela 62	– Concentração de Dureza Total do domínio hidrogeológico cristalino.....	138
Tabela 63	– Concentração de STD médio das águas do domínio hidrogeológico cristalino.....	139
Tabela 64	– Potabilidade das águas do domínio hidrogeológico cristalino (de acordo com Portaria nº 2914 do Ministério da Saúde).....	140
Tabela 65	– Classes de água para fins de irrigação do domínio hidrogeológico cristalino durante todas as etapas de campo (julho/2010 a abril/2012).....	143
Tabela 66	– pH das águas dos aquíferos aluvionares no período de coleta.....	144
Tabela 67	– Condutividade elétrica em $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ das águas dos aquíferos aluvionares.....	145
Tabela 68	– Relações de abundância dos cátions das águas dos aquíferos aluvionares.....	151

Tabela 69	–	Relações de abundância dos ânions das águas dos aquíferos aluvionares.....	151
Tabela 70	–	Concentração de Nitrogênio Amoniacal dos aquíferos aluvionares.....	152
Tabela 71	–	Concentração de Cálcio dos aquíferos aluvionares.....	152
Tabela 72	–	Concentração de Ferro dos aquíferos aluvionares.....	152
Tabela 73	–	Concentração de Magnésio dos aquíferos aluvionares.....	152
Tabela 74	–	Concentração de Sódio dos aquíferos aluvionares.....	153
Tabela 75	–	Concentração de Potássio dos aquíferos aluvionares.....	153
Tabela 76	–	Concentração de Bicarbonato dos aquíferos aluvionares.....	153
Tabela 77	–	Concentração de Cloreto dos aquíferos aluvionares.....	153
Tabela 78	–	Concentração de Fluoreto dos aquíferos aluvionares.....	154
Tabela 79	–	Concentração de Ortofosfato dos aquíferos aluvionares.....	154
Tabela 80	–	Concentração de Nitrato dos aquíferos aluvionares.....	154
Tabela 81	–	Concentração de Nitrito dos aquíferos aluvionares.....	154
Tabela 82	–	Concentração de Sulfato dos aquíferos aluvionares.....	155
Tabela 83	–	Concentração de Sílica dos aquíferos aluvionares.....	155
Tabela 84	–	Concentração de Alcalinidade Total dos aquíferos aluvionares.....	155
Tabela 85	–	Concentração de Dureza Total dos aquíferos aluvionares.....	155
Tabela 86	–	Concentração de Dureza Total dos aquíferos aluvionares.....	156
Tabela 87	–	Potabilidade das águas dos aquíferos aluvionares (de acordo com a Portaria nº 2914 do Ministério da Saúde).....	157
Tabela 88	–	Classes de água para fins de irrigação dos aquíferos aluvionares durante todas as etapas de campo (julho/2010 a abril/2012).....	159
Tabela 89	–	Concentrações de Bicarbonato (mg/L), Alcalinidade Total (mg/L) e pH da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e estiagem (novembro/2011).....	161
Tabela 90	–	Concentrações de Ortofosfato (mg/L) e Fósforo Total (mg/L) da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e estiagem (novembro/2011).....	164
Tabela 91	–	Concentrações de Nitrogênio Amoniacal, Nitrato, Nitrito e Nitrogênio Total (mg/L) da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e estiagem (novembro/2011).....	167
Tabela 92	–	Concentração de Sílica (mg/L) da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e estiagem (novembro/2011).....	169

Tabela 93	– Condutividade elétrica em $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, STD (mg/L) e Salinidade (%) da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e estiagem (novembro/2011).....	171
Tabela 94	– Concentrações de Cloreto (mg/L) e Sulfato (mg/L) da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e estiagem (novembro/2011).....	173
Tabela 95	– Concentrações de Dureza Total (mg/L), Cálcio (mg/L) e Magnésio (mg/L) da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e estiagem (novembro/2011).....	175
Tabela 96	– Concentrações de Sódio (mg/L) e Potássio (mg/L) da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e estiagem (novembro/2011).....	177
Tabela 97	– Concentração de Ferro (mg/L), Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e Oxigênio Dissolvido (mg/L) da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e estiagem (novembro/2011).....	180
Tabela 98	– Concentração dos metais tóxicos presentes nas águas do rio Banabuiú e aquíferos aluvionares.....	183
Tabela 99	– Valores de $\delta^{18}\text{O}$ (‰), δD (‰) e precipitação para água de chuva da região de Banabuiú, no período estudado.....	187
Tabela 100	– Variação do volume acumulado, $\delta^{18}\text{O}$ (‰), CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$) e Cl^{-} ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$).....	191
Tabela 101	– Valores de $\delta^{18}\text{O}$ (‰) e δD (‰) das águas dos rios Banabuiú e Quixeramobim, no período estudado.....	196
Tabela 102	– Valores das médias de $\delta^{18}\text{O}$ (‰) e δD (‰) das águas dos rios Banabuiú e Quixeramobim, no período estudado.....	196
Tabela 103	– Valores de $\delta^{18}\text{O}$ (‰) e δD (‰) das águas dos poços do domínio hidrogeológico cristalino, no período estudado.....	199
Tabela 104	– Valores das médias de $\delta^{18}\text{O}$ (‰) e δD (‰) das águas dos poços do domínio hidrogeológico cristalino, no período estudado.....	199
Tabela 105	– Valores de $\delta^{18}\text{O}$ (‰) e δD (‰) das águas dos poços dos aquíferos aluvionares, no período estudado.....	202
Tabela 106	– Valores das médias de $\delta^{18}\text{O}$ (‰) e δD (‰) das águas dos poços dos aquíferos aluvionares, no período estudado.....	202

Tabela 107 – Valores de $\delta^{18}\text{O}$ (‰) e δD (‰) da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e estiagem (novembro/2011).....	207
---	-----

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01 – Pluviometria da média mensal do período de 1988 a 2012 no município de Banabuiú.....	36
Gráfico 02 – Pluviometria anual do período de 1988 a 2012 no município de Banabuiú...	36
Gráfico 03 – Temperatura média do período de 2009 a 2012 no município de Banabuiú...	38
Gráfico 04 – Evapotranspiração potencial média mensal para o período de 2009 a 2012 e precipitação média mensal para o período de 1988 a 2012.....	39
Gráfico 05 – Pressão Atmosférica (médias mensais) do período de 2009 a 2012 no município de Banabuiú.....	41
Gráfico 06 – Umidade Relativa do Ar (médias mensais) do período de 2009 a 2012 no município de Banabuiú.....	42
Gráfico 07 – Direção do vento do período de 2009 a 2012 no município de Banabuiú..	44
Gráfico 08 – Média do volume anual do açude Banabuiú do período de 1986 a 2012...	57
Gráfico 09 – Média mensal do pH das águas superficiais (Média Geral, açude Banabuiú, rio Banabuiú e rio Quixeramobim).....	106
Gráfico 10 – Média mensal da CE das águas superficiais (açude Banabuiú, rio Banabuiú e rio Quixeramobim).....	108
Gráfico 11 – Média mensal do pH das águas do domínio hidrogeológico cristalino.....	129
Gráfico 12 – Comparação das médias mensais dos valores de pH para os domínio hidrogeológicos cristalino e aluvionar, e águas superficiais.....	144
Gráfico 13 – Comparação entre as médias mensais dos valores de CE para os poços dos aquíferos aluvionares e a precipitação pluviométrica nos meses estudados, de julho de 2010 a abril de 2012.....	146
Gráfico 14 – Concentrações Médias de Bicarbonato (mg/L) e Alcalinidade Total (mg/L) da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e estiagem (novembro/2011).....	162
Gráfico 15 – pH da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e estiagem (novembro/2011).....	162
Gráfico 16 – Concentrações de Ortofosfato (mg/L) e Fósforo Total (mg/L) da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e estiagem (novembro/2011)..	165
Gráfico 17 – Concentrações de Nitrogênio Amoniacal (mg/L) e Nitrato (mg/L) da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e estiagem (novembro/2011)..	168

Gráfico 18 – Concentração de Nitrogênio Total (mg/L) da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e estiagem (novembro/2011).....	168
Gráfico 19 – Concentração de Sílica (mg/L) da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e estiagem (novembro/2011).....	169
Gráfico 20 – Condutividade elétrica em $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e estiagem (novembro/2011).....	172
Gráfico 21 – Concentração de Cloreto (mg/L) da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e estiagem (novembro/2011).....	173
Gráfico 22 – Concentração de Sulfato (mg/L) da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e estiagem (novembro/2011).....	174
Gráfico 23 – Concentração de Dureza Total (mg/L) da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e estiagem (novembro/2011).....	176
Gráfico 24 – Concentrações de Cálcio (mg/L) e Magnésio (mg/L) da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e estiagem (novembro/2011).....	176
Gráfico 25 – Concentração de Sódio (mg/L) da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e estiagem (novembro/2011).....	178
Gráfico 26 – Concentração de Potássio (mg/L) da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e estiagem (novembro/2011).....	178
Gráfico 27 – Concentração de Ferro (mg/L) da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e estiagem (novembro/2011).....	181
Gráfico 28 – Concentrações de Oxigênio Dissolvido (mg/L) e Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e estiagem (novembro/2011).....	181
Gráfico 29 – δD (‰) versus $\delta^{18}\text{O}$ (‰) para as águas de chuva na região de Banabuiú.....	188
Gráfico 30 – Variação temporal da precipitação mensal (mm) no posto Banabuiú e volume acumulado (hm^3) no açude Banabuiú.....	192
Gráfico 31 – Variação temporal do oxigênio-18 ($\delta^{18}\text{O}$ ‰) e Condutividade Elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) no açude Banabuiú.....	192
Gráfico 32 – Variação temporal do oxigênio-18 ($\delta^{18}\text{O}$ ‰) e concentração de cloreto (mg/L) no açude Banabuiú.....	193
Gráfico 33 – Variação sazonal de $\delta^{18}\text{O}$ (‰) das águas dos rios Banabuiú e Quixeramobim, e precipitação pluviométrica, no período estudado.....	197

Gráfico 34 – Variação sazonal de $\delta^{18}\text{O}$ (‰) das águas dos poços do domínio hidrogeológico cristalino, e precipitação pluviométrica, no período estudado.	200
Gráfico 35 – Variação sazonal de $\delta^{18}\text{O}$ (‰) das águas dos poços dos aquíferos aluvionares, e precipitação pluviométrica, no período estudado.....	203
Gráfico 36 – $\delta^{18}\text{O}$ (‰) versus δD (‰) das águas da chuva, do açude Banabuiú, dos rios Quixeramobim e Banabuiú, e dos poços do aluvião e do domínio hidrogeológico cristalino.....	205
Gráfico 37 – Valores de $\delta^{18}\text{O}$ (‰) da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e de estiagem (novembro/2011).....	208
Gráfico 38 – Valores de δD (‰) da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e de estiagem (novembro/2011).....	208

LISTA DE QUADROS

Quadro 01	– Erro admissível nas análises dos íons maiores.....	77
Quadro 02	– Classificação das águas para irrigação segundo o diagrama do Laboratório de Salinidade dos Estados Unidos - USSSL.....	79
Quadro 03	– Classificação do Índice de Qualidade de Água.....	82
Quadro 04	– Limites de STD para irrigação, propostos pela <i>Environmental Protection Agency</i> - EPA.....	127
Quadro 05	– Classificação para água subterrânea, com base na concentração (mg/L) de STD.....	139
Quadro 06	– Condutividade elétrica em $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ das águas dos aquíferos aluvionares do estudo realizado por Moura (2008).....	147
Quadro 07	– Valores do limite de detecção (Ld) do aparelho.....	184
Quadro 08	– Valores de referência para potabilidade da água de acordo com a Portaria N° 2914/2011 do Ministério da Saúde.....	184

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	27
2	OBJETIVOS.....	31
2.1	Objetivo Geral.....	31
2.2	Objetivos Específicos.....	31
3	DESCRIÇÃO DA ÁREA DE TRABALHO.....	32
3.1	Localização e Acesso.....	32
3.2	Condições Climáticas.....	34
3.3	Precipitação Pluviométrica.....	34
3.4	Temperatura.....	37
3.5	Evaporação.....	38
3.6	Pressão Atmosférica.....	40
3.7	Umidade Relativa do Ar.....	41
3.8	Caracterização dos Ventos.....	42
3.9	Aspectos da Vegetação.....	45
3.10	Aspectos Sociais e Econômicos.....	46
3.11	Aspectos Pedológicos.....	47
3.11.1	Planossolo Solódico.....	49
3.11.2	Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico.....	49
3.11.3	Neossolo Litólico Eutrófico.....	50
3.12	Hipsometria.....	50
3.13	Aspectos Geomorfológicos.....	50
3.13.1	Planícies Aluvionares.....	52
3.13.2	Depressão Sertaneja.....	52
3.13.3	Maçãos Residuais.....	52
3.14	Aspectos Geológicos.....	53
3.15	Recursos Hídricos.....	56
3.15.1	Águas Superficiais.....	56
3.15.2	Águas Subterrâneas e Aspectos Hidrogeológicos.....	59
4	METODOLOGIA E LEVANTAMENTO DE DADOS.....	61
4.1	Cadastro dos Pontos de Amostragem (Poços e Águas Superficiais).....	61
4.2	Elaboração do Mapa Potenciométrico.....	64

4.2.1	Níveis Estáticos.....	64
4.2.2	Determinação dos Dados Planialtimétricos.....	65
4.2.3	Utilização do Software Surfer 8.0.....	65
4.3	Caracterização Geométrica.....	66
4.3.1	Levantamento Geofísico.....	67
4.3.2	Desenvolvimento dos Trabalhos de Campo.....	68
4.4	Balanço Hídrico.....	69
4.4.1	Recarga de Água Subterrânea.....	70
4.4.2	Estimativa de Recarga pelo Método do Balanço Hídrico.....	71
4.5	Cálculo das Reservas Hídricas Subterrâneas.....	73
4.5.1	Reserva Reguladora.....	73
4.5.2	Reserva Permanente.....	74
4.6	Hidroquímica.....	74
4.6.1	Tratamento Hidroquímico.....	76
4.6.2	Balanço Iônico.....	77
4.6.3	Diagrama de <i>Piper</i>	77
4.6.4	Classificação da Água para a Irrigação.....	78
4.7	Índice de Qualidade das Águas – IQA.....	80
4.8	Metais Pesados.....	82
4.9	Isótopos.....	83
4.10	Estratificação – Dinâmica das Águas Superficiais Armazenadas.....	87
4.10.1	Análises físico-químicas da água do açude Banabuiú.....	88
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	91
5.1	Superfície Potenciométrica.....	91
5.2	Interpretação Geofísica.....	96
5.3	Balanço Hídrico.....	100
5.3.1	Avaliação da Reserva Reguladora pelo Método do Balanço Hídrico.....	100
5.4	Avaliação das Reservas Reguladora e Permanente.....	103
5.4.1	Reserva Reguladora.....	103
5.4.2	Reserva Permanente.....	104
5.5	Hidroquímica das Águas Superficiais.....	105
5.5.1	pH.....	105
5.5.2	Condutividade Elétrica.....	107

5.5.3	Classificação das Águas Superficiais pelos Íons Dominantes.....	108
5.5.4	Classificação das Águas Superficiais pelo IQA.....	111
5.5.5	Qualidade das Águas para Consumo Humano e Irrigação.....	117
5.6	Hidroquímica do Domínio Hidrogeológico Cristalino.....	128
5.6.1	pH.....	128
5.6.2	Condutividade Elétrica.....	130
5.6.3	Classificação das Águas do Domínio Hidrogeológico Cristalino pelos Íons Dominantes.....	130
5.6.4	Qualidade das Águas do Domínio Hidrogeológico Cristalino para Consumo Humano e Irrigação.....	138
5.7	Hidroquímica dos Aquíferos Aluvionares.....	143
5.7.1	pH.....	143
5.7.2	Condutividade Elétrica.....	144
5.7.3	Classificação das Águas dos Aquíferos Aluvionares pelos Íons Dominantes.....	149
5.7.4	Qualidade das Águas dos Aquíferos Aluvionares para Consumo Humano e Irrigação.....	156
5.8	Estratificação – Dinâmica Físico-química das Águas do Açude Banabuiú.....	159
5.8.1	Carbono.....	160
5.8.2	Fósforo.....	163
5.8.3	Nitrogênio.....	166
5.8.4	Sílica.....	169
5.8.5	Condutividade Elétrica.....	170
5.8.6	Cloreto e Sulfato.....	172
5.8.7	Dureza Total, Cálcio e Magnésio.....	174
5.8.8	Sódio e Potássio.....	177
5.8.9	Ferro, Temperatura e Oxigênio Dissolvido.....	179
5.9	Metais Pesados.....	182
5.10	Isótopos de Oxigênio-18 e Deutério.....	186
5.10.1	Águas Meteóricas.....	186
5.10.2	Água do Açude Banabuiú.....	191
5.10.3	Águas dos Rios Quixeramobim e Banabuiú.....	195
5.10.4	Águas dos Poços do Domínio Hidrogeológico Cristalino.....	198

5.10.5	Águas dos Poços dos Aquíferos Aluvionares.....	201
5.11	Estratificação – Dinâmica Isotópica da Água do Açude Banabuiú.....	206
6	CONCLUSÕES.....	209
	REFERÊNCIAS.....	212
	ANEXOS.....	219

1. INTRODUÇÃO

A disponibilidade hídrica da região de Banabuiú é significativa, comparando-se à de outras regiões do sertão cearense, e sua exploração tem como finalidades a pecuária e a irrigação das lavouras. Esta condição somente foi viabilizada após a instalação de uma válvula no açude Arrojado Lisboa (açude Banabuiú), que libera uma vazão necessária para perenização do rio Banabuiú. No período de estiagem existe uma demanda de água subterrânea para a agropecuária.

Segundo Ab'Saber (2003), a grande região seca, constituída pelos sertões do Nordeste brasileiro, é a mais homogênea do ponto de vista fisiográfico, ecológico e social dentre todos os domínios. A particularidade é mais expressiva quando se considera que nosso país apresenta 92 % do seu espaço total dominado por climas úmidos e subúmidos intertropicais e subtropicais, da Amazônia ao Rio Grande do Sul.

A área de estudo é localizada às margens do açude Banabuiú e dos rios Banabuiú e Quixeramobim, no sertão do Nordeste brasileiro, na porção Central do Estado do Ceará.

De acordo com a Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH), em julho de 2009 o açude Banabuiú se encontrava com 92,3 % (1.477.854.336 m³) de sua capacidade total, no entanto, 01 ano antes, em março de 2008 acumulava apenas 32,3 % (516.700.000 m³) da sua capacidade, o que demonstra a complexidade da operação deste reservatório para garantir as necessidades dos usuários. Dada à importância da água neste contexto, é necessário:

- a) cuidar da preservação/conservação dos mananciais superficiais e subterrâneos contra os agentes poluidores;
- b) conhecer os processos naturais responsáveis pela sua qualidade e identificar os mecanismos de recarga, que podem ter origem nas precipitações e/ou alimentação através do rio perenizado;
- c) estimar o volume de água subterrânea armazenada nos aquíferos aluvionares da área estudada.

Para se pesquisar todos estes fatores são realizados estudos hidrodinâmicos e hidroquímicos dos recursos hídricos da região.

Sabe-se que em épocas de estiagem a água subterrânea é uma fonte estratégica de sobrevivência no semiárido; na região de estudo não é diferente, e este recurso hídrico presente nos aquíferos é explorado com mais intensidade. Estes domínios hidrogeológicos (cristalino e sedimentar) possuem uma função estratégica de extrema importância, que é de

proteção do recurso hídrico, tanto da evaporação (muito acentuada na região), quanto de poluidores naturais e antrópicos.

A proteção das águas subterrâneas envolve dois aspectos complementares: problemas associados à superexploração, ou seja, a retirada sem controle e danosa de água; e à contaminação do recurso hídrico subterrâneo, que leva, muitas vezes, à degradação irreversível da qualidade das águas do aquífero (HIRATA, 1997, p. 1).

Os aquíferos representam fontes limitadas, e num passado recente a exploração destes recursos era impossibilitada devido aos péssimos acessos, contudo, ao exemplo dos aquíferos aluvionares, hoje, a exploração da água subterrânea representa uma fonte potencial de desenvolvimento na região. De acordo com Ceará (2008), os depósitos aluvionares são os aquíferos mais utilizados pela população do interior cearense por se constituírem, na estação seca anual, na única possibilidade de obtenção de água através da construção de poços rasos.

Os pequenos aquíferos aluvionares são recursos hídricos particularmente importantes nas áreas semiáridas de embasamento cristalino. Com efeito, as rochas cristalinas maciças têm uma porosidade primária quase nula e, por conseguinte, o armazenamento de água é limitado à porosidade secundária desenvolvida nas fraturas (BURTE, 2008, p. 2).

Para estudar, entender e avaliar os aspectos da hidrodinâmica da área de estudo, caracterizando assim a geometria dos aquíferos aluvionares, foram realizados os levantamentos de cadastro dos poços e geofísicos, mapa de superfície potenciométrica e balanço hídrico que possibilitaram a determinação das reservas hídricas subterrâneas (renovável e permanente). Este tema deve ser ainda mais exaltado por se tratar do Nordeste do Brasil, onde o clima semiárido é desfavorável à precipitação pluviométrica, ou seja, as águas subterrâneas são recursos estratégicos de sobrevivência e desenvolvimento.

Os recursos hídricos subterrâneos representam fontes estratégicas, com forte alcance social para fixação e sobrevivência do homem no período de estiagem. O conhecimento das reservas hídricas traz benefícios à população, favorecendo atividades econômicas e de subsistência, fornecendo dados para a gestão dos recursos hídricos e levando ao uso racional da água (conservação). Portanto, faz-se necessário conhecer detalhadamente as condições hidrogeológicas e hidroquímicas e entender o funcionamento dos aquíferos.

O açude Banabuiú (Arrojado Lisboa), que em janeiro de 2002 estava apenas com 0,6 % do seu volume total, enfrentou uma das piores situações dos últimos 27 anos, esta situação se tornou um desafio para os gestores das águas em termos de planejamento e operacionalização do sistema de perenização do vale do Banabuiú.

A dinâmica de um reservatório, definida pela sua forma de uso e pelas condições naturais da bacia (geomorfologia, relevo, ventos, precipitação), determina a qualidade dos recursos hídricos, e o conseqüente impacto que estes podem causar. O reconhecimento destas relações pode subsidiar a definição de um conjunto adequado de programas e medidas para compatibilizar a qualidade da água com os diferentes usos projetados (MEIRELES, 2007, p. 48).

O gerenciamento de represas deve apoiar-se em um processo constante de monitoramento e avaliação dos mecanismos de funcionamento, em um conhecimento profundo da limnologia desses ecossistemas. Como estes reservatórios são utilizados para usos múltiplos (irrigação, abastecimento, recreação etc.), a determinação da qualidade da água, a avaliação dos futuros impactos e o monitoramento permanente são fundamentais para a compreensão dos processos de integração que ocorrem entre os usos da bacia hidrográfica, os usos múltiplos e a conservação ou deterioração da qualidade da água (TUNDISI; TUNDISI, 2008, p. 321).

Notoriamente, percebe-se que é de extrema importância o estudo da estratificação vertical no açude Banabuiú, pois com a análise da limnologia do mesmo poder-se-á encontrar soluções para resolver problemas como o aumento da concentração de íons no fundo do reservatório, ou a diminuição de oxigênio dissolvido à mesma profundidade.

Como consequência do aumento da taxa de crescimento populacional, da necessidade de produção de alimentos e crescimento do setor industrial, além das frequentes estiagens, a crescente demanda de água torna a água subterrânea um patrimônio de valor muito elevado, funcionando como reserva emergencial e influenciando decisivamente no desenvolvimento político-sócio-econômico de qualquer região. Assim, tornam-se necessários estudos na busca de adequar o uso, controle, monitoramento e preservação (conservação) destes recursos hídricos.

Para implementar um programa de conservação de água é necessário, inicialmente, um estudo da distribuição de consumo. O programa varia com as especificidades dos sistemas e usuários e deve ser específico para cada região estudada. O dimensionamento é importante na decisão do tipo de sistema e para o seu melhor aproveitamento, evitando a produção além da necessidade. Os projetos de conservação de água levarão a significativos ganhos ambientais, sociais e econômicos, que devem ser considerados. Uma das maneiras de ajudar na conservação é a utilização das águas de melhor qualidade para usos nobres.

De acordo com a Agência Nacional de Águas – ANA (2012), a avaliação oferta/demanda dos recursos hídricos de Banabuiú, até 2015, requer uma ampliação do sistema de abastecimento. Contudo, deve-se salientar que não importa a quantidade de água, se esta não tiver qualidade para consumo humano, ou até mesmo, qualidade para ser tratada e consumida. Percebe-se então a importância do estudo químico, físico e biológico das águas superficiais e subterrâneas da Bacia Hidrográfica do Rio Banabuiú. Este estudo qualitativo, na

medida do possível financeiro, foi realizado e teve como referência a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) N° 357, de 17 de março de 2005, que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e da outras providências; e a Portaria do Ministério da Saúde (MS) N° 2914 de 12 de dezembro de 2011, que dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.

Segundo Rebouças (1997), a água não é uma matéria prima como as outras, nem somente uma matéria prima. Ela é ao mesmo tempo um bem vital, econômico e ambiental.

Por todas estas razões, torna-se urgente e necessário para os usuários e gestores, conhecer os aspectos qualitativos e quantitativos das águas subterrâneas e superficiais do Vale do Banabuiú, e o funcionamento dos aluviões dos rios Quixeramobim e Banabuiú como aquíferos, para um gerenciamento correto (conservação) do sistema hídrico da região, no qual são construídos poços para suprir as necessidades dos irrigantes, o que pode comprometer a perenização do vale do Banabuiú.

Este estudo pretende investigar a inter-relação entre as águas da chuva, do açude Banabuiú, dos rios Quixeramobim e Banabuiú e as águas dos aquíferos aluvionares e do domínio hidrogeológico cristalino, na Bacia Hidrográfica do Rio Banabuiú, no trecho entre Quixeramobim e Banabuiú, analisando e efetuando comparações entre os dados físico-químicos, biológicos e isotópicos das águas pluviais, superficiais e subterrâneas, adquiridos trimestralmente durante três anos (2010 a 2012), para identificar a contribuição de água subterrânea para o rio e infiltração a partir deste, incrementando a recarga dos aquíferos, e assim fornecendo mais informações sobre a hidrodinâmica da área.

Para a investigação da inter-relação citada, usou-se os isótopos estáveis do oxigênio (^{18}O) e do hidrogênio (^2H ou D) para definir a origem da recarga dos aquíferos, pois, os valores de ^{18}O e D se tornam maiores em águas sujeitas a evaporação, ou seja, as águas dos açudes Banabuiú, rios Quixeramobim e Banabuiú sofrem diretamente com a evaporação, isto implica em valores elevados dos isótopos pesados, já a água da chuva possui valores baixos dos isótopos. Portanto, a investigação ocorre a partir destas observações, sendo que o domínio hidrogeológico cristalino e os aquíferos aluvionares podem receber recarga direta da chuva (valores baixos de ^{18}O e D), ou por infiltração das águas superficiais (valores elevados de ^{18}O e D).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Aprofundar os conhecimentos hidrológicos na Bacia Hidrográfica do Rio Banabuiú entre os municípios de Quixeramobim e Banabuiú, abordando o açude Banabuiú, o rio Banabuiú, o rio Quixeramobim, o domínio hidrogeológico cristalino (aquífero cristalino) e o domínio hidrogeológico das Formações Cenozóicas (aquíferos aluvionares), em relação à quantidade e qualidade das águas, proporcionando com isto uma extração sustentável dos recursos hídricos subterrâneos e superficiais.

2.2 Objetivos Específicos

- Elaborar mapas potenciométricos, a partir de poços existentes, monitorando as variações dos níveis estáticos dos poços e efetuando um levantamento planialtimétrico;
- Estimar a reserva reguladora utilizando o método do balanço hídrico.
- Determinar as espessuras das camadas sedimentares dos aquíferos e estimar a reserva permanente dos mesmos, a partir de levantamento geofísico por resistividade;
- Avaliar a qualidade da água para os seus diversos usos (pecuária, irrigação e consumo humano), realizando medidas em campo e análises laboratoriais de parâmetros físico-químicos e metais pesados das águas dos poços, dos rios Banabuiú e Quixeramobim, do açude Banabuiú, e também gerando um IQA (Índice de Qualidade de Água) para as águas superficiais, através de parâmetros físicos, químicos e biológicos;
- Conhecer os mecanismos de recarga dos aquíferos aluvionares, realizando interpretações isotópicas (^{18}O e D) nas águas dos poços, dos rios Banabuiú e Quixeramobim, do açude Banabuiú e da chuva;
- Avaliar a dinâmica das águas superficiais armazenadas através das mudanças sazonais na comparação isotópica e qualidade da água liberada pelo açude Banabuiú (efeitos de estratificação), monitorando parâmetros físico-químicos da água em três níveis de profundidade durante um período de 24 horas, nos períodos de chuva e estiagem.

3 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE TRABALHO

3.1 Localização e Acesso

A área de estudo está inserida no Sertão Central do Estado do Ceará, e dentro da Bacia Hidrográfica do Rio Banabuiú.

Situados a cerca de 180 km (em linha reta) da capital cearense, ligados através dos trechos da BR 116 e CE 060, os municípios de Quixeramobim e Banabuiú estão localizados nas microrregiões de Quixeramobim e Sertão de Quixeramobim (Figura 01). Limitam-se ao Norte com os municípios de Quixadá, Choró e Madalena; ao Sul, com Jaguaratama, Milhã, Solonópole e Senador Pompeu; a Leste, com Jaguaratama, Morada Nova, Milhã, Solonópole e Quixadá; e a Oeste, com Madalena, Boa Viagem, Senador Pompeu e Pedra Branca.

Quixeramobim situa-se nas coordenadas UTM 9425312 S e 467554 W. Sua Sede está a 191,7 metros de altitude. Banabuiú situa-se nas coordenadas UTM 9413098 S e 508802 W. Sua Sede está a 100 metros de altitude (IPECE, 2010 e 2011, p. 5). O *datum* utilizado para o enquadramento da área foi o WGS84, assim como as coordenadas que se encontram no decorrer do estudo. A Tabela 01 mostra as coordenadas dos vértices da área que engloba os objetos de estudo, no entanto, focou-se nas áreas do açude Banabuiú, dos rios Banabuiú e Quixeramobim e dos poços em seu entorno, ou seja, o objeto de estudo não abrange toda a área visualizada no mapa. A Tabela 02 contribuiu para o melhor entendimento e visualização do contexto aqui estudado, e mostra os pontos de amostragem abordados e suas nomenclaturas que serão visualizados nas figuras a frente.

Tabela 01 – Coordenadas dos vértices envolvente da área de estudo.

COORDENADAS UTM		
VÉRTICE	LATITUDE (SUL)	LONGITUDE (OESTE)
01	9398000	482000
02	9436000	482000
03	9436000	572000
04	9398000	572000

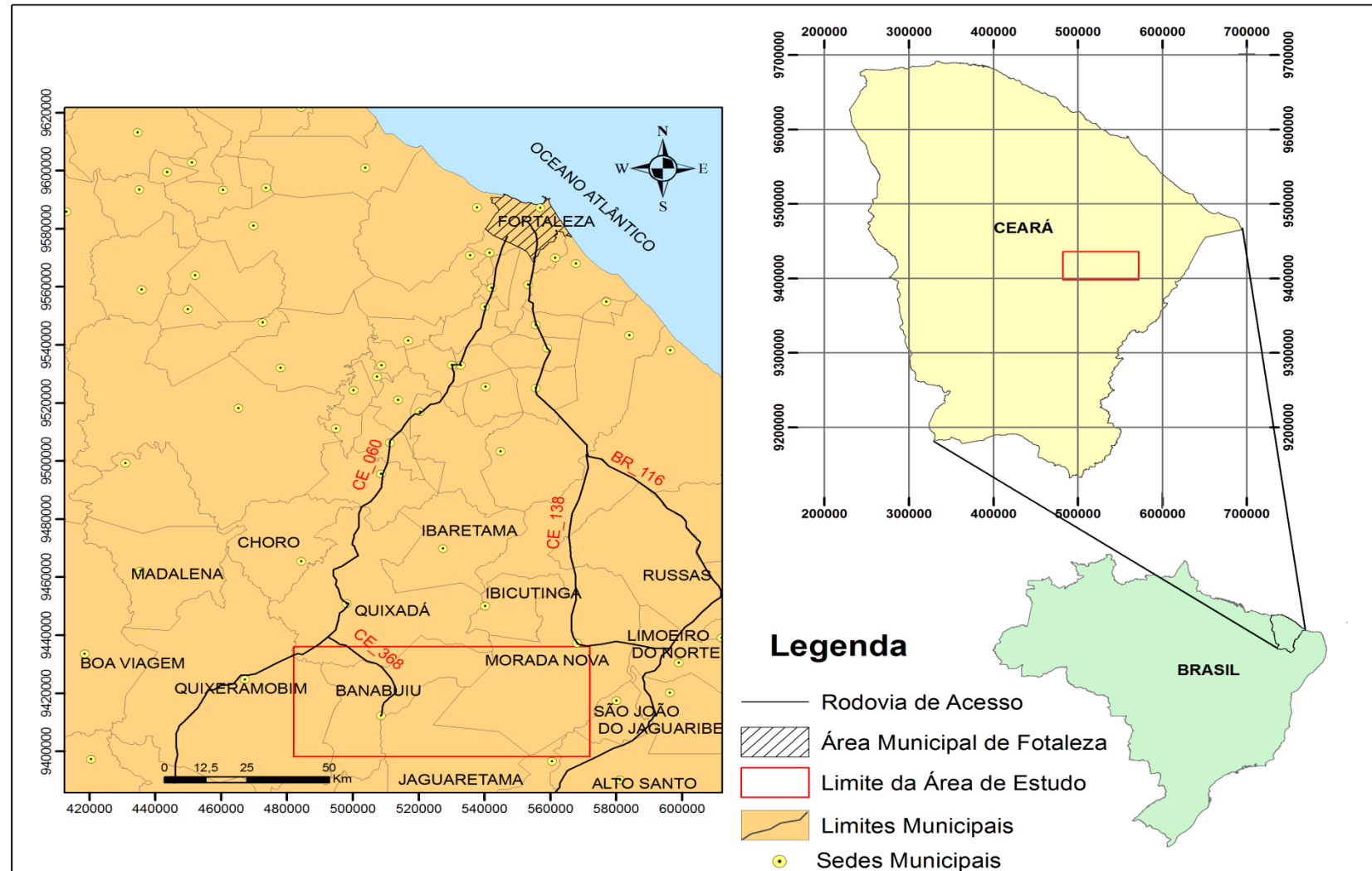
Fonte: O autor.

Tabela 02 – Nomenclatura dos pontos de amostragem utilizada neste estudo.

Nomenclatura	Ponto de Amostragem
AB	Açude Banabuiú
PA	Poço do Aluvião
PC	Poço do Domínio Hidrogeológico Cristalino
RB	Rio Banabuiú
RQ	Rio Quixeramobim

Fonte: O autor.

Figura 01 – Mapa de localização da área estudada.



Fonte: Base Cartográfica do Serviço Geológico do Brasil – CPRM (2003).

Desde 2007, uma ampla pesquisa vem sendo desenvolvida por Moura (2008), no qual o autor abordou o aluvião do rio Banabuiú no trecho entre Morada Nova e Limoeiro do Norte, ou seja, após a confluência dos rios Quixeramobim e Banabuiú à Jusante do açude Banabuiú. Definiu-se o trecho entre Quixeramobim e Morada Nova para concluir a pesquisa na área da Bacia Hidrográfica do Rio Banabuiú. Portanto, se examinou as águas do açude Banabuiú, dos rios Quixeramobim e Banabuiú, sendo estudadas tanto as águas dos rios ainda não misturadas à montante do açude Banabuiú, quanto a água de saída da válvula do açude até Morada Nova, água esta do rio Banabuiú à Jusante do açude, ou seja, água resultante da mistura dos dois rios.

3.2 Condições Climáticas

O clima é tropical quente semiárido, predominante no Nordeste brasileiro, marcado pela existência de dois períodos definidos: um seco e longo e outro úmido, curto e irregular (IPECE, 2010 e 2011, p. 5).

A área de estudo possui a seguinte combinação de fatores: solos rasos; afloramentos rochosos com alteração superficial das rochas; presença de planícies semiáridas levemente sulcadas por cursos d'água temporários; drenagens exorréicas intermitentes; ambiente quente e seco, com baixa umidade durante o período das secas; solos rasos e variados, de difícil discriminação; campos de *inselbergs*; superfícies rochosas e campos de matações. Com isto, baseando-se nos termos da classificação de Ab'Saber (2003), o domínio morfoclimático de Quixeramobim e Banabuiú é o de Caatingas Semiáridas.

3.3 Precipitação Pluviométrica

Nas áreas de Quixeramobim e Banabuiú, a influência do clima regional nas condições de pluviometria é marcante. A área se caracteriza pela existência de dois períodos pluviométricos distintos, um seco e outro chuvoso. Esse último ocorre de dezembro a maio, com maiores precipitações no mês de abril. Os outros meses do ano são secos ou de baixas precipitações. O período de agosto a novembro é o de menor precipitação.

Segundo o IPECE, *op. cit.*, as médias anuais de precipitações, de Quixeramobim e Banabuiú, situam-se em torno de 707 e 815 mm (estes valores referem-se a uma média de todos os postos pluviométricos dos municípios), respectivamente.

De acordo com Ceará (2009), os municípios que fazem parte da Bacia Hidrográfica do Rio Banabuiú apresentam precipitação média anual em torno de 725,4 mm. Ibicuitinga (974,0 mm), Piquet Carneiro (897,0 mm) e Pedra Branca (853,0 mm) apresentam os maiores índices pluviométricos.

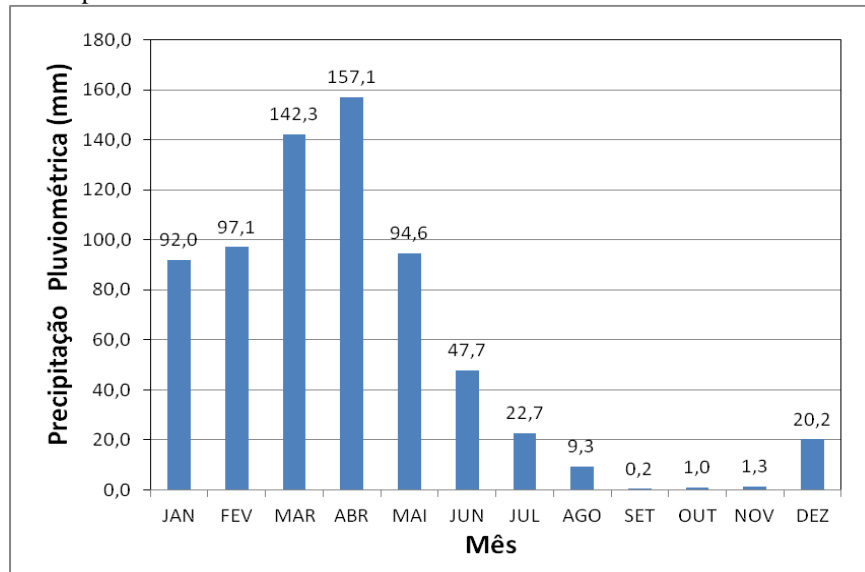
A análise dos dados pluviométricos da série histórica de 25 anos (1988 a 2012) do posto Banabuiú, monitorado pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), apresentou o mês de setembro como o mais seco (média de 0,2 mm), e o mês de abril como o mais chuvoso (média de 157,1 mm), resultando numa elevada amplitude de 156,9 mm (Tabela 03 e Gráfico 01). A distribuição temporal das chuvas na região, nesses 25 anos, mostra que o período chuvoso tende a iniciar em dezembro e terminar em agosto. Sendo que, de dezembro até abril, o volume precipitado aumenta, e a partir daí diminui até parar de chover, iniciando o período seco, que vai de agosto até novembro.

Tabela 03 – Precipitação pluviométrica média do período de 1988 a 2012 no município de Banabuiú.

PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA (mm)	
MESES	MÉDIA MENSAL
JANEIRO	92,0
FEVEREIRO	97,1
MARÇO	142,3
ABRIL	157,1
MAIO	94,6
JUNHO	47,7
JULHO	22,7
AGOSTO	9,3
SETEMBRO	0,2
OUTUBRO	1,0
NOVEMBRO	1,3
DEZEMBRO	20,2
Total Anual	685,5

Fonte: Posto Banabuiú/FUNCEME (2013).

Gráfico 01 – Pluviometria da média mensal do período de 1988 a 2012 no município de Banabuiú.

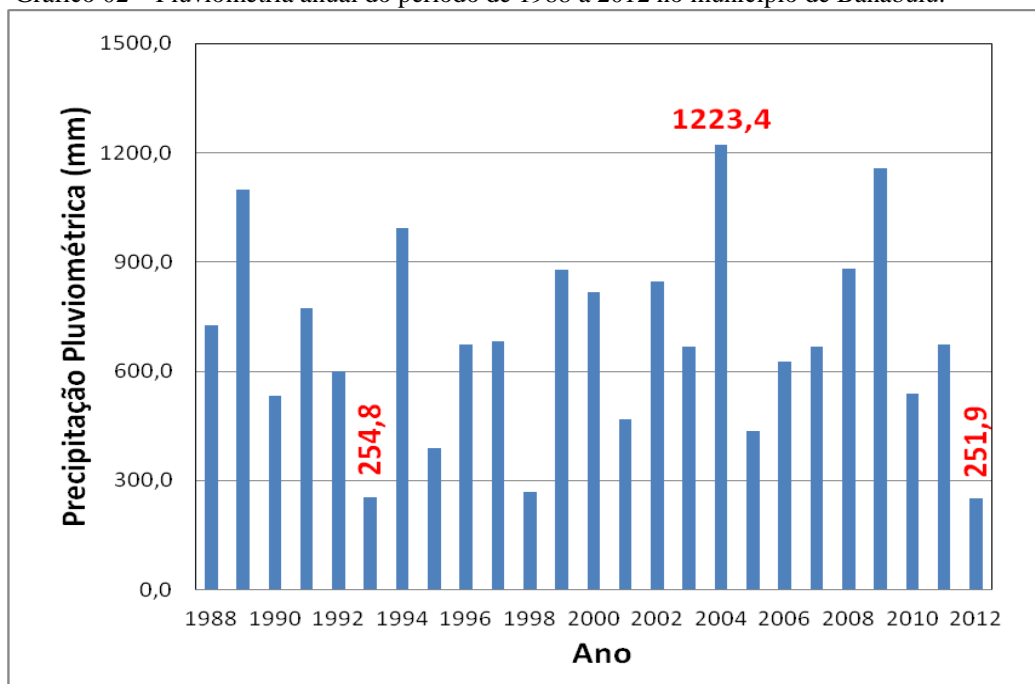


Fonte: Posto Banabuiú/FUNCEME (2013).

A média histórica da precipitação anual, da série de 25 anos, foi de 685,5 mm (este valor corresponde a uma média do período de 1988 a 2012 do posto Banabuiú), sendo que 583,2 mm (85 %) correspondem à precipitação acumulada nos meses de janeiro a maio.

De 1988 a 2012, a máxima precipitação anual foi 1.223,4 mm, ocorrida no ano de 2004. E o ano de 1993 era considerado o mais seco (do período de monitoramento), com 254,8 mm de precipitação pluviométrica, no entanto, o ano de 2012 teve uma precipitação pluviométrica anual de 251,9 mm, sendo considerado o mais seco desde 1988 (Gráfico 02).

Gráfico 02 – Pluviometria anual do período de 1988 a 2012 no município de Banabuiú.



Fonte: Posto Banabuiú/FUNCEME (2013).

No período de medição do nível estático e de coleta de amostras (2010 - 2012) das águas superficiais, subterrâneas e da chuva, os anos de 2010 e 2011, com valores em torno da média histórica, foram considerados normais.

3.4 Temperatura

A Bacia Hidrográfica do Rio Banabuiú, devido sua baixa latitude e conseqüente proximidade com a linha do Equador, apresenta regime térmico bastante uniforme. Apresenta temperaturas elevadas com médias anuais de 25,7 a 28,1 °C e amplitudes térmicas inferiores a 05 °C (Tabela 04 e Gráfico 03).

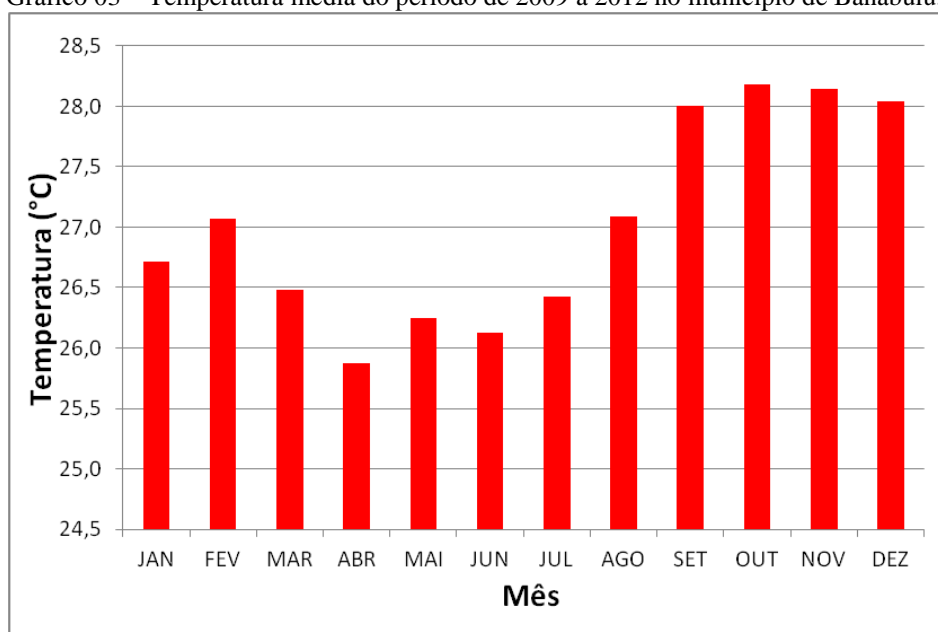
Tabela 04 – Temperatura média do período de 2009 a 2012 no município de Banabuiú.

TEMPERATURA (°C)					
MESES\ANOS	2009	2010	2011	2012	MÉDIA MENSAL
JAN	SD	26,7	25,5	27,9	26,7
FEV	SD	28,8	25,4	27,0	27,1
MAR	24,5	28,9	25,1	27,4	26,5
ABR	24,0	26,3	25,0	28,3	25,9
MAI	24,4	27,1	25,2	28,3	26,2
JUN	24,0	26,6	26,2	27,7	26,1
JUL	24,2	28,0	25,8	27,7	26,4
AGO	25,4	27,9	26,8	28,2	27,1
SET	26,9	28,5	28,3	28,2	28,0
OUT	27,7	28,4	27,9	28,7	28,2
NOV	28,1	28,9	26,9	28,6	28,1
DEZ	27,8	26,8	28,5	29,0	28,0
MÉDIA ANUAL	25,7	27,7	26,4	28,1	27,0

Fonte: Posto Banabuiú/INPE (2013).

SD – Sem Dados.

Gráfico 03 – Temperatura média do período de 2009 a 2012 no município de Banabuiú.



Fonte: Posto de coleta de dados de Banabuiú/INPE (2013).

A temperatura dos municípios é estável, variando de 25,9 a 28,2 °C (médias mensais), uma vez que suas variações mensais, de janeiro a dezembro de cada ano estudado aqui neste trabalho (2009 - 2012), situam-se em torno de 3 °C (média entre máximas e mínimas de cada ano). Contudo, essa variação anual não se repercute no período diurno, as médias diurnas são muito elevadas com máximas de 33 °C e mínimas em torno de 23 °C, isto, devido à forte insolação incidente durante o dia, característica da semiaridez da área.

3.5 Evaporação

Evaporação ou vaporização é o processo pelo qual as moléculas de água, na superfície líquida ou na umidade do solo, adquirem suficiente energia, através da radiação solar, e passam do estado líquido para o de vapor. E, na prática, as águas evaporadas e transpiradas são muito difíceis de medir separadamente (MANOEL FILHO *in*: FEITOSA *et al.*, 2008, p. 57).

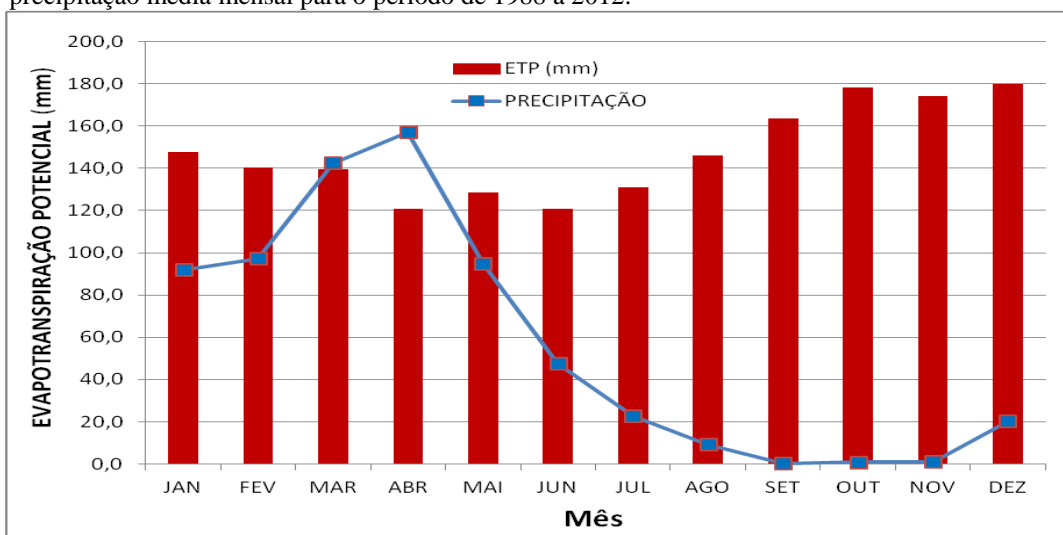
Usa-se o valor da Evapotranspiração Potencial (ETP) como valor máximo para as perdas por evaporação e transpiração. Estes valores foram calculados segundo a fórmula proposta por Thornthwaite (1948). O Gráfico 04 e a Tabela 05 mostram a distribuição da Evapotranspiração mensal média calculada.

Tabela 05 – Evapotranspiração potencial média mensal calculada segundo a fórmula de Thornthwaite (1948) para o período de 2009 a 2012.

MESES	ETP (mm)
JANEIRO	147,7
FEVEREIRO	140,3
MARÇO	139,6
ABRIL	120,8
MAIO	128,7
JUNHO	120,6
JULHO	131,1
AGOSTO	146,1
SETEMBRO	163,6
OUTUBRO	178,1
NOVEMBRO	174,0
DEZEMBRO	179,9
TOTAL (mm/ano)	1770,5

Fonte: O autor.

Gráfico 04 – Evapotranspiração potencial média mensal para o período de 2009 a 2012 e precipitação média mensal para o período de 1988 a 2012.



Fonte: Posto de coleta de dados de Banabuiú/FUNCEME (2013).

No geral, estas condições climáticas apresentadas para a região favorecem o fenômeno da evaporação, conseqüentemente, ocorrem perdas hídricas consideráveis, principalmente devido à grande quantidade de espelhos d'água na região estudada. Nota-se a correlação da evapotranspiração com a temperatura, e suas proporcionalidades, ou seja, quanto maior a temperatura, maior será a evapotranspiração potencial da região, e a correlação com a precipitação, que é inversamente proporcional a evapotranspiração.

3.6 Pressão Atmosférica

Segundo Geomundo (2012), a pressão atmosférica é dependente de fatores como latitude, altitude e temperatura. Em regiões com temperaturas elevadas, como a região da Linha do Equador, o ar se dilata ficando mais leve, e por causa disto, estes locais apresentam uma baixa pressão. Já em regiões frias, a baixa temperatura deixa o ar mais denso, tendo uma maior pressão. Longhini e Nardi (2009) fizeram experiências para observar uma tese comprovada mundialmente que o movimento do ar (vento) decorre da diferença de pressão, este se desloca no sentido das altas pressões para as áreas de baixa pressão. E de acordo com a Sala de Física (2012), o ar atua como uma cobertura que se opõe à evaporação, ou seja, a velocidade da evaporação diminui quando a pressão atmosférica aumenta.

A pressão atmosférica na região estudada apresenta uma média mensal de 992,9 mbar, variando de 991,2 mbar em dezembro a 994,9 mbar em agosto (Gráfico 05). A Tabela 06 mostra as médias mensais e anuais da pressão atmosférica, e nota-se que a variação anual é de 0,1 ou 0,2 mbar, ou seja, em 04 anos não houve uma mudança significativa.

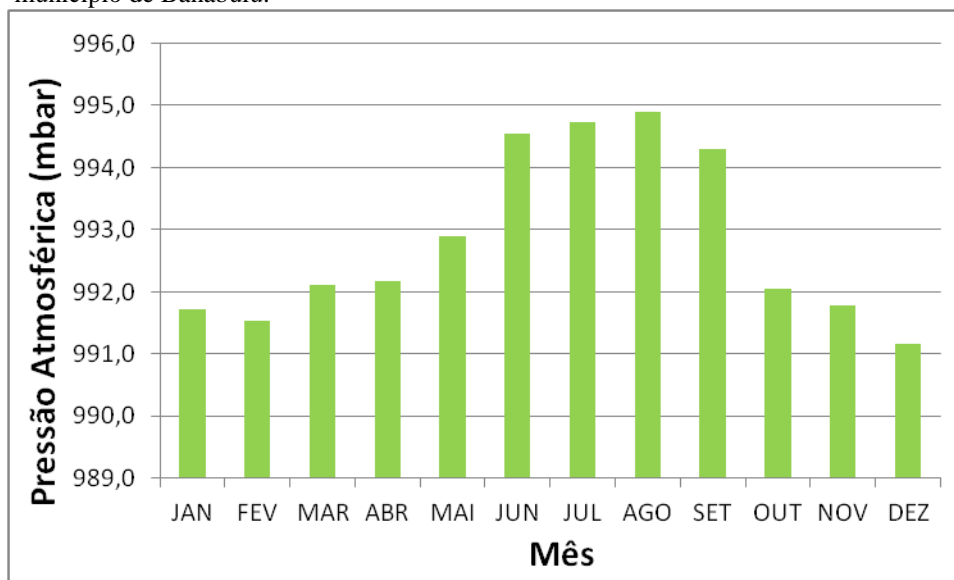
Tabela 06 – Pressão Atmosférica (médias mensais e anuais) do período de 2009 a 2012 no município de Banabuiú.

PRESSÃO ATMOSFÉRICA (mbar)					
MESES\ANOS	2009	2010	2011	2012	MÉDIA MENSAL
JANEIRO	SD	992,3	990,9	991,9	991,7
FEVEREIRO	SD	991,5	991,6	991,5	991,5
MARÇO	992,8	991,7	991,7	992,3	992,1
ABRIL	992,6	992,1	992,0	992,0	992,2
MAIO	993,5	992,6	992,3	993,2	992,9
JUNHO	994,7	994,9	994,1	994,6	994,6
JULHO	995,2	994,6	994,6	994,6	994,7
AGOSTO	994,7	995,0	994,6	995,2	994,9
SETEMBRO	994,8	993,5	994,0	995,0	994,3
OUTUBRO	992,4	992,2	991,6	992,0	992,0
NOVEMBRO	991,7	990,9	993,0	991,5	991,8
DEZEMBRO	991,6	990,3	991,6	991,1	991,2
MÉDIA ANUAL	992,7	992,6	992,7	992,9	992,9

Fonte: Posto Banabuiú/INPE (2013).

SD – Sem Dados.

Gráfico 05 – Pressão Atmosférica (médias mensais) do período de 2009 a 2012 no município de Banabuiú.



Fonte: Posto de coleta de dados de Banabuiú/INPE (2013).

3.7 Umidade Relativa do Ar

A umidade relativa do ar cresce de modo inversamente proporcional à temperatura. Assim como na pressão atmosférica, a velocidade da evaporação diminui quando a umidade relativa do ar aumenta. A média mensal da umidade relativa do ar nos 04 anos estudados é de 62,3 %, e possui variação máxima de 21,2 % entre os meses de abril, com 72,9 % e setembro, com 51,7 % (Gráfico 06).

Nota-se que 2010 e 2012 foram anos de baixa umidade relativa do ar (58,8 e 55,6 %) em relação aos outros, este resultado é congruente com as elevadas temperaturas (médias anuais) de 27,7 e 28,1 °C dos referentes anos.

A Tabela 07 mostra a pressão atmosférica (médias mensais e anuais) nos 04 anos estudados.

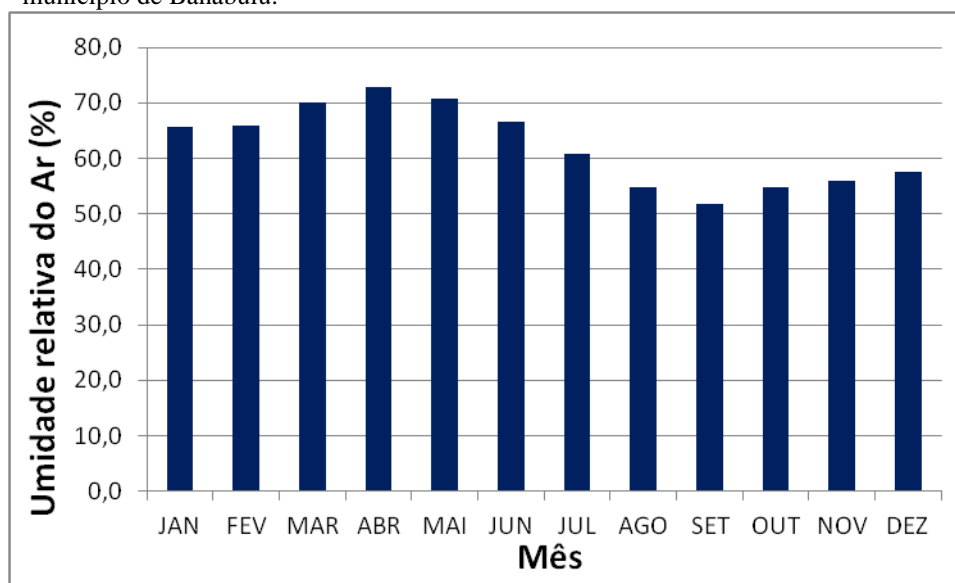
Tabela 07 – Umidade Relativa do Ar (médias mensais e anuais) do período de 2009 a 2012 no município de Banabuiú.

UMIDADE RELATIVA DO AR (%)					
MESES\ANOS	2009	2010	2011	2012	MÉDIA MENSAL
JAN	SD	65,9	71,7	59,3	65,6
FEV	SD	58,8	74,5	64,5	65,9
MAR	79,4	60,0	76,9	64,0	70,1
ABR	79,8	73,1	78,5	60,3	72,9
MAI	80,9	67,8	77,4	57,1	70,8
JUN	76,9	63,3	68,4	58,2	66,7
JUL	75,4	49,4	65,9	52,6	60,8
AGO	64,1	48,5	59,5	47,5	54,9
SET	59,1	47,5	51,0	49,1	51,7
OUT	56,7	55,3	57,3	49,6	54,7
NOV	54,9	51,3	65,2	52,6	56,0
DEZ	57,7	64,4	54,9	52,8	57,4
MÉDIA ANUAL	68,5	58,8	66,8	55,6	62,3

Fonte: Posto Banabuiú/INPE (2013).

SD – Sem Dados.

Gráfico 06 – Umidade Relativa do Ar (médias mensais) do período de 2009 a 2012 no município de Banabuiú.



Fonte: Posto de coleta de dados de Banabuiú/INPE (2013).

3.8 Caracterização dos Ventos

A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é um dos mais importantes sistemas meteorológicos de circulação da atmosfera global, atuante nas proximidades do Equador, transferindo calor e umidade dos níveis inferiores atmosféricos das baixas latitudes para os níveis superiores da troposfera e para médias e altas latitudes. É responsável pelas precipitações sobre as áreas costeiras da Amazônia e do Nordeste brasileiro.

A interação terra-mar é de grande importância para se entender o posicionamento da ZCIT ao norte e ao sul do equador. Diversas variáveis físicas são utilizadas para localizar as flutuações no posicionamento médio da ZCIT. A convergência entre as duas massas de ar geralmente se dá sobre os oceanos, enquanto que, sobre os continentes, a zona limítrofe entre as massas de ar é um gradiente de umidade.

A zona de convergência de massas é responsável pela precipitação nos trópicos e é a principal fonte geradora de chuvas na porção Nordeste do Brasil, particularmente nos estados do Ceará, Rio Grande do Norte e Maranhão. Tal fato é observado

quando o pico de precipitação sobre essa região (março e abril) ocorre próximo à época em que a ZCIT atinge suas posições mais ao sul. Ao mesmo tempo, na região da África Ocidental, a posição mais a norte da descontinuidade intertropical marca o auge da estação chuvosa, sob influência da umidade proveniente do Oceano Atlântico (EDUCAR BRASIL, 2010).

Os chamados ventos alísios são ventos de baixos níveis atmosféricos, caracterizados por grande consistência em sua direção. No Hemisfério Sul, eles sopram de sudeste para noroeste e, no Hemisfério Norte, eles sopram de nordeste para sudoeste (EDUCAR BRASIL, *op. cit.*). A ZCIT juntamente com os ventos alísios são importantes porque de acordo com Esteves (2011), promovem a criação de lagoas (reservatórios) no Nordeste brasileiro, como no caso das lagoas da região dos Lençóis Maranhenses.

A importância do vento para um reservatório (açude, lago etc.) no meio do semiárido é notável, pois sua interação pode aumentar ou diminuir a evaporação, podendo claramente intervir no microclima daquele ambiente, alterando a biota aquática. O vento torna-se de vital importância para o estudo de estratificação de um reservatório, porque devido a sua velocidade, constância e intensidade, a camada d'água superficial pode ser deslocada para o fundo do reservatório, e a água que estava no fundo vai à superfície (por diferença de densidade) fazendo assim um ciclo de mistura, logo, toda esta interação do vento com o reservatório pode influenciar na qualidade da estratificação da lâmina d'água do açude Banabuiú.

A velocidade média dos ventos no período chuvoso ($2,8 \text{ m.s}^{-1}$) é classificada, segundo a escala de Beaufort (INPE, 2013), como brisas leves ($1,8 - 3,3 \text{ m.s}^{-1}$). Os ventos apresentam maiores velocidades em setembro, outubro e novembro (média de $3,9 \text{ m.s}^{-1}$), quando a velocidade média dos ventos é classificada como brisa fraca ($3,4 - 5,2 \text{ m.s}^{-1}$). A velocidade média dos ventos na bacia é de $3,1 \text{ m.s}^{-1}$, segundo a média das estações de Quixeramobim e Morada Nova (INMET, 2013). As médias mensais e anuais do período estudado podem ser observadas na Tabela 08.

Tabela 08 – Velocidade média dos ventos ($m.s^{-1}$) na Bacia Hidrográfica do Rio Banabuiú.

VELOCIDADE DO VENTO ($m.s^{-1}$)					
MESES/ANOS	2009	2010	2011	2012	MÉDIA MENSAL
JANEIRO	3,7	3,0	2,5	3,7	3,2
FEVEREIRO	2,8	3,2	2,5	3,0	2,9
MARÇO	2,4	3,0	2,1	3,0	2,6
ABRIL	2,1	2,2	2,1	3,1	2,4
MAIO	2,0	2,4	2,1	3,3	2,4
JUNHO	2,6	2,7	2,3	3,1	2,7
JULHO	2,2	2,6	1,8	3,9	2,6
AGOSTO	3,1	3,5	3,4	3,6	3,4
SETEMBRO	3,7	4,2	3,7	SD	3,9
OUTUBRO	4,0	3,8	3,5	SD	3,8
NOVEMBRO	4,0	4,0	3,7	SD	3,9
DEZEMBRO	3,6	3,1	3,8	SD	3,5
MÉDIA	3,0	3,1	2,8	3,3	3,1

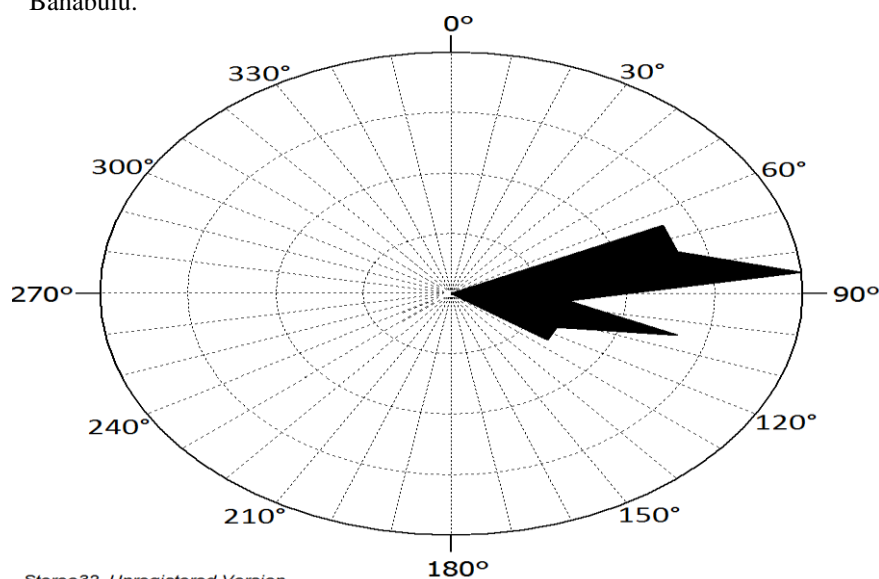
Fonte: Postos Quixeramobim e Morada Nova/INMET (2013).

SD – Sem Dados.

Quanto à direção dos ventos da Bacia Hidrográfica do Rio Banabuiú, observa-se um amplo predomínio na direção leste (E), representado no Gráfico 07 e na Tabela 09 pelo valor $89,4^\circ$, esta tabela apresenta as médias mensais e anuais dos ventos para os anos 2009, 2010, 2011 e 2012. Conhecer esta direção dos ventos é importante devido ao açude Banabuiú possuir uma forma dendrítica, e isto pode ocasionar em certos locais do açude uma proteção maior ou menor dos morros e vegetação contra a ação dos ventos neste reservatório.

Para a visualização da direção predominante (projeção estereográfica) do vento no Gráfico 07, usou-se o programa Stereo32 Versão 1.0.3 (RÖLLER; TREPMMANN, 2011).

Gráfico 07 – Direção do vento do período de 2009 a 2012 no município de Banabuiú.



Stereo32, Unregistered Version

Fonte: Posto de coleta de dados de Banabuiú/INPE (2013).

Tabela 09 – Direção do vento (médias mensais e anuais) do período de 2009 a 2012 no município de Banabuiú.

DIREÇÃO DO VENTO (°)					
MESES\ANOS	2009	2010	2011	2012	MÉDIA MENSAL
JANEIRO	SD	76,3	86,4	70,4	77,7
FEVEREIRO	SD	69,9	91,6	87,3	82,9
MARÇO	90,1	72,8	88,6	73,7	81,3
ABRIL	114,5	102,7	106,7	78,1	100,5
MAIO	142,7	109,9	122,6	77,3	113,1
JUNHO	139,5	141,2	130,6	92,2	125,9
JULHO	86,4	125,0	112,8	91,1	103,8
AGOSTO	97,6	103,3	89,6	103,8	98,6
SETEMBRO	73,0	88,2	90,6	75,0	81,7
OUTUBRO	65,8	73,4	69,6	74,7	70,9
NOVEMBRO	66,8	72,8	75,6	60,8	69,0
DEZEMBRO	64,6	73,2	68,2	63,8	67,5
MÉDIA ANUAL	94,1	92,4	94,4	79,0	89,4

Fonte: Postos Quixeramobim e Morada Nova/INMET (2013).

SD – Sem Dados.

3.9 Aspectos da Vegetação

Devido ao tipo de solo e ao clima, as vegetações nativas predominantes nos municípios de Quixeramobim e Banabuiú são a Caatinga Arbustiva Aberta e a Caatinga Arbustiva Densa. Ainda são encontradas pontualmente, Floresta Caducifólia Espinhosa, Floresta Subcaducifólia Tropical Pluvial e Floresta Mista Dicotillo-Palmácea (IPECE, 2010 e 2011, p. 5).

De acordo com a Fundação Instituto de Pesquisa e Informação do Ceará – IPLANCE (1997), Caatinga Arbustiva é a comunidade que se caracteriza por apresentar árvores de porte mais baixo (10 m), cujas folhas caem totalmente na época seca, possuindo ainda caules retorcidos e esbranquiçados. A densidade maior ou menor dos indivíduos componentes da comunidade é que determina sua caracterização como Caatinga Arbustiva Densa ou Caatinga Arbustiva Aberta.

Os principais tipos de culturas desenvolvidas na área de Quixeramobim englobam feijão, milho, arroz, algodão e fruticultura, e na área de Banabuiú englobam algodão, caju, milho e feijão.

Segundo Burte (2008), nas regiões semiáridas (precipitação inferior a 800 mm), mesmo com um *deficit* hídrico pronunciado, as chuvas concentradas durante os poucos meses da estação chuvosa são geralmente suficientes para assegurar um ritmo sazonal para a vegetação e para os escoamentos dos rios, o que não é o caso nas regiões hiper-áridas (precipitação inferior a 50 mm) ou áridas (precipitação inferior a 150 mm).

3.10 Aspectos Sociais e Econômicos

De acordo com o IBGE, em 2010 a população dos municípios de Quixeramobim e Banabuiú era de 71.887 e 17.315 habitantes, respectivamente. Possuíam uma densidade demográfica de 21,59 e 16,03 hab/km², respectivamente. Nota-se uma diferença muito grande de habitantes e de densidade demográfica em comparação a Fortaleza, pois em 2010, a Capital do Estado do Ceará possuía 2.452.185 de habitantes e uma densidade demográfica de 7.786,52 hab/km².

A economia dos municípios tem sua base na agricultura, pecuária, comércio, indústria e serviços.

Quixeramobim destaca-se por ter o maior rebanho bovino leiteiro do Estado do Ceará, onde possui aproximadamente 60.000 cabeças de bovino e produz 110.000 litros de leite/dia. Possui também rebanhos significativos de: ovino, caprino, suíno, asinino, muar e galináceo. As culturas mais desenvolvidas no município são: Feijão, Milho, Arroz, Algodão e Fruticultura (PREFEITURA DE QUIXERAMOBIM, 2011).

Segundo IPECE (2010), até 2008, Quixeramobim tinha 4.069 empregos formais, representando 0,36 % de empregos formais do Estado do Ceará. Quixeramobim em 2007 possuía um PIB (Produto Interno Bruto) *per capita* (R\$ 1,00) de 4.034, enquanto o Estado possuía um PIB *per capita* (R\$ 1,00) de 6.149. Seu PIB por setor (em %) era distribuído em agropecuária (12,9 %), indústria (28,5 %) e serviços (58,7 %). Já o Estado possuía seu PIB (em %) distribuído em agropecuária (6,2 %), indústria (23,6 %) e serviços (70,2 %).

Banabuiú apresenta agricultura de subsistência e comercialização de algodão, caju, milho e feijão. Atualmente destaca-se a plantação de hortas no estuário do rio Banabuiú. A criação de bovino, suíno e avícola é o destaque da pecuária banabuiense.

A principal fonte de renda na zona rural é a agricultura, a pesca e a pecuária, e na sede a principal fonte de renda é o comércio e os empregos ofertados por duas indústrias: a LIBRA LIGAS DO BRASIL S/A, fábrica de ferro silício e a CHESF (Companhia Hidroelétrica do São Francisco) que tem por finalidade principal levar, através de linhas de transmissão, energia até a capital cearense, Fortaleza.

Segundo IPECE (2010), até 2010, Banabuiú tinha 1.204 empregos formais, representando 0,09 % de empregos formais do Estado do Ceará. Banabuiú em 2008 possuía um PIB (Produto Interno Bruto) *per capita* (R\$ 1,00) de 4.577, enquanto o Estado possuía um PIB *per capita* (R\$ 1,00) de 7.112. Seu PIB por setor (em %) era distribuído em agropecuária

(20,5 %), indústria (18,3 %) e serviços (61,2 %). Já o Estado possuía seu PIB (em %) distribuído em agropecuária (7,1 %), indústria (23,6 %) e serviços (69,3 %).

3.11 Aspectos Pedológicos

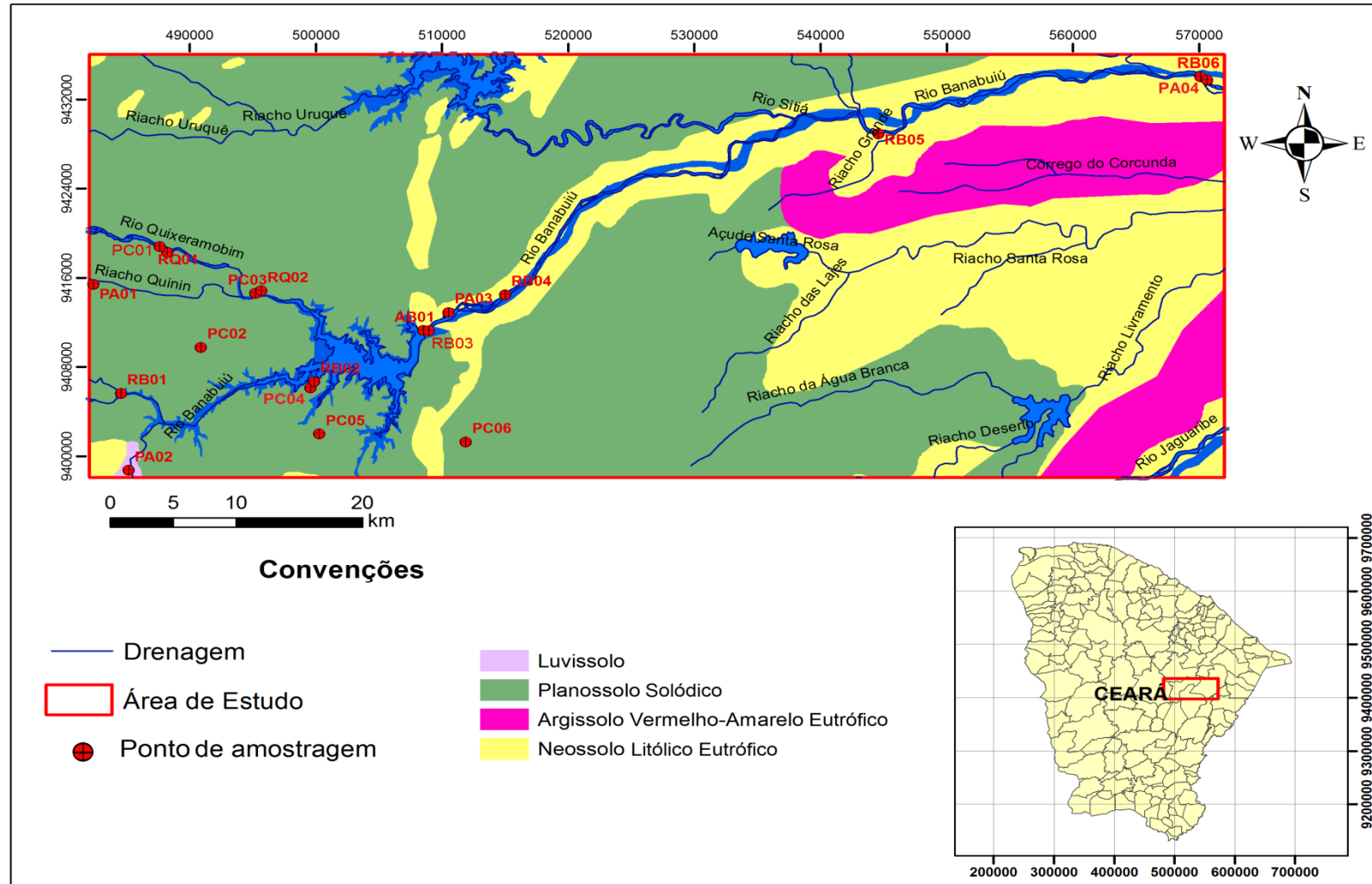
Os solos na depressão sertaneja, em geral, são pouco espessos, pedregosos e desenvolvidos a partir da alteração de rochas do embasamento cristalino. Predominam Neossolos Litólicos de textura arenosa e média, Luvisolos, textura média/argilosa, e Argissolos Vermelho-Amarelos, argila de atividade baixa e textura média/argilosa (IBGE, 1999, p. 20).

Os solos da região são oriundos principalmente da alteração “*in situ*” de rochas (granitos e gnaisses) ou de materiais coluviais mobilizados a partir das mesmas.

A classificação de solos aqui tratada encontra-se de acordo com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA (2006). Segundo o Atlas da Secretaria de Recursos do Estado do Ceará – SRH (2012), na área de estudo são encontrados principalmente as classes de solos: Planossolo Solódico, Neossolo Litólico Eutrófico e Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico (Figura 02). No entanto, encontram-se ainda difundidos nos municípios estudados os tipos de solos: Neossolo Quartzarênico Marinho, Neossolo Quartzarênico Eutrófico, Neossolo Litólico Distrófico, Neossolo Regolítico Eutrófico, Luvisolo e Chernossolo.

Características comuns às diversas classes encontradas na região são: a pequena espessura, geralmente inferior a 1,00 m; a textura arenosa dos horizontes superficiais e areno-argilosa ou argilosa nos horizontes sotopostos; e, a ocorrência eventual de fragmentos de rochas.

Figura 02 – Mapa dos solos (pedológico) no trecho entre Quixeramobim e Banabuiú - Ceará.



Fonte: Baseado no atlas da Secretaria de Recursos Hídricos do Ceará.

As caracterizações e definições citadas para os solos abaixo (Neossolos Litólicos, Luvisolos e Argissolos Vermelho-Amarelos) foram pesquisadas e retiradas de EMBRAPA (2006).

3.11.1 *Planossolo Solódico*

A classe de 1º nível Planossolo compreende solos minerais imperfeitamente ou mal drenados, com horizonte superficial ou subsuperficial eluvial, de textura mais leve, que contrasta abruptamente com o horizonte B ou com transição abrupta conjugada com acentuada diferença de textura do A para o horizonte B imediatamente subjacente, adensado, geralmente de acentuada concentração de argila, permeabilidade lenta ou muito lenta, constituindo, por vezes, um horizonte responsável pela formação de lençol d'água sobreposto (suspenso), de existência periódica e presença variável durante o ano.

Os solos desta classe ocorrem preferencialmente em áreas de relevo plano ou suave ondulado, onde as condições ambientais e do próprio solo favorecem vigência periódica anual de excesso de água, mesmo que de curta duração, especialmente em regiões sujeitas à estiagem prolongada, e até mesmo sob condições de clima semiárido.

O caráter Solódico é usado para distinguir horizontes ou camadas que apresentem saturação por sódio ($100 \text{ Na}^+/\text{T}$) variando de 6 % a < 15 %, em alguma parte da seção de controle que defina a classe. O valor T é Capacidade de troca de cátions.

3.11.2 *Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico*

A classe de 1º nível Argissolo compreende solos constituídos por material mineral, que têm como características diferenciais a presença de horizonte B textural de argila de atividade baixa, ou alta conjugada com saturação por bases baixa ou caráter alítico. São forte a moderadamente ácidos, com saturação por bases alta, ou baixa, predominantemente caulíníticos e com relação molecular Ki, em geral, variando de 1,0 a 3,3.

A classe de 2º nível Argissolo Vermelho-Amarelo agrega solos de cores vermelho-amareladas e amarelo-avermelhadas que não se enquadram nas outras classes deste 2º nível. Para finalizar, a classe de 3º nível Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico possui saturação por bases $\geq 50\%$ na maior parte dos primeiros 100 cm do horizonte B (inclusive BA).

3.11.3 Neossolo Litólico Eutrófico

A classe de 1º nível Neossolo, compreende solos constituídos por material mineral, ou por material orgânico pouco espesso, que não apresentam alterações expressivas em relação ao material originário devido à baixa intensidade de atuação dos processos pedogenéticos, seja em razão de características inerentes ao próprio material de origem, como maior resistência ao intemperismo ou composição química, ou dos demais fatores de formação (clima, relevo ou tempo), que podem impedir ou limitar a evolução dos solos.

A classe de 2º nível Neossolo Litólico agrega solos com horizonte A, em contato diretamente com a rocha ou sobre um horizonte C, e que apresentam um contato lítico típico ou fragmentário dentro de 50 cm da superfície do solo. E por fim, a classe de 3º nível Neossolo Litólico Eutrófico engloba solos com saturação por bases alta ($V > 50\%$).

3.12 Hipsometria

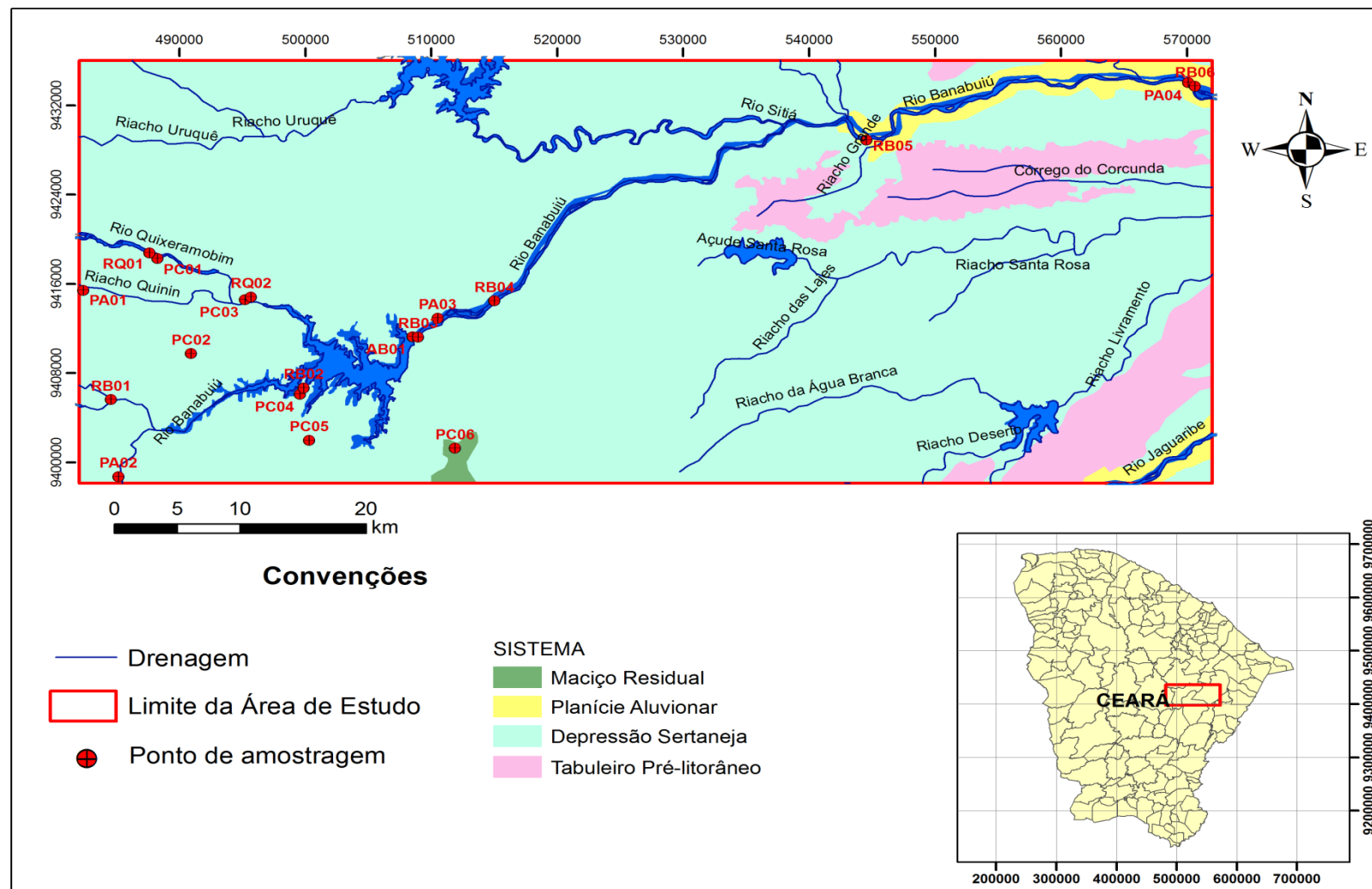
De acordo com o mapa hipsométrico do Estado do Ceará (IPECE), o município de Quixeramobim situa-se na faixa de altitudes inferiores a 700 m, sendo que em sua maior parte do território as altitudes são inferiores a 500 m. Já o município de Banabuiú situa-se na faixa de altitudes inferiores a 500 m, sendo que em sua maior parte do território as altitudes são inferiores a 200 m.

As cotas altimétricas, em relação ao Nível do Mar, dos municípios de Quixeramobim e Banabuiú são 191,7 m e 100 m, respectivamente (IPECE, 2010 e 2011, p. 5).

3.13 Aspectos Geomorfológicos

O relevo dos municípios apresenta-se caracterizado em seu aspecto geral, com base no mapa do Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2003), escala de 1:50.000, por três (03) unidades geomorfológicas principais: Planícies Aluvionares, Depressão Sertaneja e Maciços Residuais (Figura 03).

Figura 03 – Mapa Geomorfológico no trecho entre Quixeramobim e Banabuiú - Ceará.



3.13.1 Planícies Aluvionares

As Planícies Aluvionares englobam as áreas mais expressivas de acumulação fluvial e, com certa continuidade, acompanhando os cursos dos principais rios da bacia, neste caso, os rios Quixeramobim e Banabuiú.

São areias finas a grosseiras, cascalhos e argilas com matéria orgânica em decomposição, formando as planícies e os terraços fluviais. De espessura variável (4,5 até 23,6 metros), em alguns locais, onde o material existe em pouca quantidade, o substrato rochoso chega a ficar exposto.

3.13.2 Depressão Sertaneja

A Depressão Sertaneja engloba a maior parte da área em estudo (por volta de 88,6 %), esta circunda os aluviões e aflora em praticamente toda área. Caracteriza-se por apresentar uma topografia predominantemente plana com pequenos setores apresentando uma dissecação incipiente traduzidos por colinas e cristas.

Desenvolvida sobre rochas do embasamento cristalino tais como migmatitos, metassedimentos, núcleos granitoides etc., por ação dos processos de intemperismo e remoção dos detritos por escoamento difuso e concentrado.

Observa-se o efeito da erosão seletiva configurado por relevos residuais (*inselbergs*) distribuídos isoladamente ou formando grupamentos a exemplo das Serras Residuais (IBGE, 1999, p. 20).

3.13.3 Maciços Residuais

Segundo Cavalcante (1998), os Maciços Residuais apresentam características úmidas e subúmidas, compreendem as serras cristalinas que apresentam extensões variadas e altitudes que oscilam de 400 a 700 metros. Estes são compostos por rochas cristalinas (metamórficas e ígneas intrusivas); possuem relevos extensivamente dissecados em formas de cristas com topos aguçados e colinas de topos convexos; a drenagem é densa, dendrítica a sub-dendrítica; possuem condições favoráveis a agricultura, mas por limitação de ordem morfodinâmica oferecem problemas de natureza conservacionista.

Os Maciços Residuais apresentam solos com boas propriedades físicas e químicas, tendo como limitação a incidência de processos erosivos acelerados que os tornam susceptíveis à erosão.

3.14 Aspectos Geológicos

As rochas ígneas e metamórficas ocupam uma grande porção da área (por volta de 94,1 %); correspondem a granitos, granodioritos, micaxistos, quartzitos, ortognaisses e anfibolitos.

Partindo das Formações mais antigas, a litoestratigrafia da área em estudo está representada por Complexo Jaguaretama, Unidade Acopiara, Grupo Orós (Formação Santarém), Grupo Orós (Formação Campo Alegre), Suíte Serra do Deserto, Suíte Intrusiva Itapuranga e Depósitos Aluvionares (Figura 04).

De acordo com GASPARY *et al.* (1967), no Complexo Jaguaretama o substrato metamórfico apresenta uma massa migmatítica com algumas ocorrências de migmatito granítico concordante, sobre a qual aparecem faixas de micaxistos. O resto da estrutura desaparece sob os aluviões. O substrato metamórfico é afetado por tectonismos resultando em *horsts*, grabens e fossas. Estas falhas condicionam as direções e os perfis longitudinais da rede de drenagem.

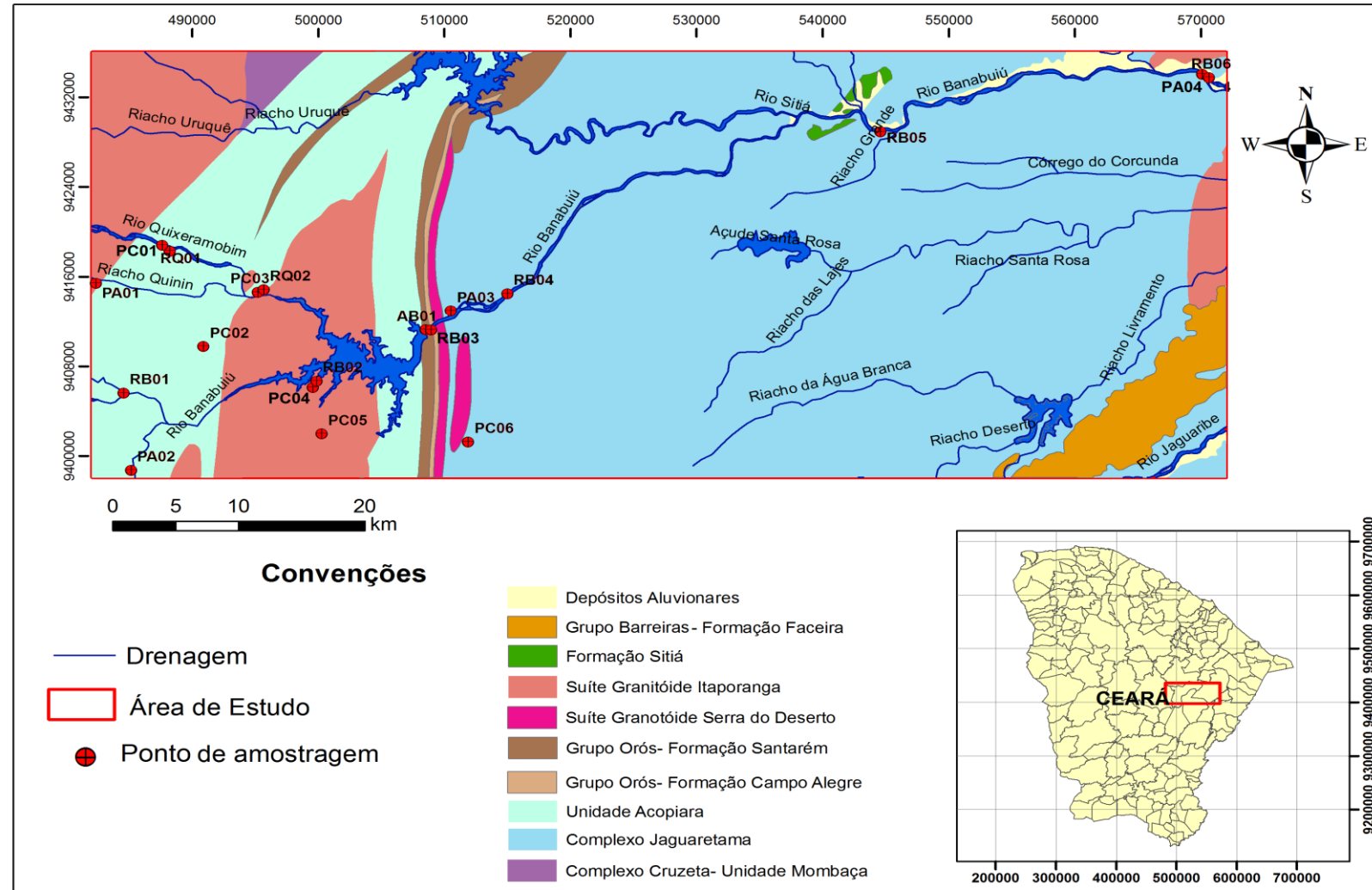
Segundo o DNPM (2012), o Grupo Orós é subdividido nas Formações Santarém (predominantemente quartzitos puros e impuros, micaxistos de granulometria fina a grossa e metacarbonatos) e Campo Alegre (meta-andesitos e metabasaltos, metariolitos, metariodacitos e intercalações de metatufos e metassedimentos), e pela Suíte Magmática Serra do Deserto (*augen* gnaisses graníticos). As características petrográficas e de estruturas sedimentares do Grupo Orós, na Formação Santarém, admitem sistemas deposicionais deltaicos e marinho raso, sendo recoberto por sedimentos de água profunda (turbiditos).

Os Depósitos Aluvionares, que variam de 4,5 até 23,6 metros de espessura, são representados por sedimentos areno-argilosos recentes (Holoceno), que ocorrem margeando as calhas dos rios e riachos que drenam a área. Na região, a composição litológica varia consideravelmente, de argilas a areias grossas, puras, e areias argilosas.

Um estudo realizado por Gomes *et al.* (2009), mostra que os sedimentos do aluvião do rio Banabuiú (trecho entre Morada Nova e Limoeiro do Norte) se enquadram nas seguintes classes texturais segundo o sistema de classificação de Shepard (1954): cascalho, cascalho arenoso, areia cascalhosa, areia, areia lamosa, lama arenosa e lama. Na camada

aquífera, o material geológico encontrado se situa nas classes cascalho, areia cascalhosa e areia. Com relação ao grau de seleção dos sedimentos, estes são pobremente a muito pobremente selecionados, o que faz reduzir a porosidade efetiva, comprometendo a capacidade de fluxo de água no interior do aquífero. Quanto às características minerais, foi constatada a predominância de quartzo, ocorrendo a presença de feldspato e em raras ocasiões conseguiu-se identificar a mica. A raridade da mica na observação em lupa não implica que ela esteja ausente, pois em grãos de argila não foi possível identificar a mineralogia, e é justamente nessa textura que os minerais de mica estão presentes em maior abundância.

Figura 04 – Mapa Litológico no trecho entre Quixeramobim e Banabuiú - Ceará.



Fonte: Base Cartográfica do Serviço Geológico do Brasil – CPRM (2003).

3.15 Recursos Hídricos

Os recursos hídricos existentes em Quixeramobim e Banabuiú compõem-se de águas superficiais (açudes, barragens, lagoas e rios perenizados) e de águas subterrâneas (poços tubulares e cacimbas).

De acordo com Ceará (2009), a Bacia Hidrográfica do Rio Banabuiú drena 15 (quinze) municípios: Banabuiú, Boa Viagem, Ibicuitinga, Itatira, Madalena, Mombaça, Monsenhor Tabosa, Morada Nova, Pedra Branca, Piquet Carneiro, Quixadá, Quixeramobim, Senador Pompeu, Limoeiro do Norte e Milhã. Estes municípios estão englobados na Bacia Hidrográfica do Rio Banabuiú, que compreende, essencialmente, os sertões centrais do Ceará mais fortemente submetidos aos rigores da semiaridez. Por sua localização central, limita-se com quase todas as Bacias do Estado, excetuando-se as bacias do Coreaú, do Litoral e a sub-bacia do Salgado.

3.15.1 Águas Superficiais

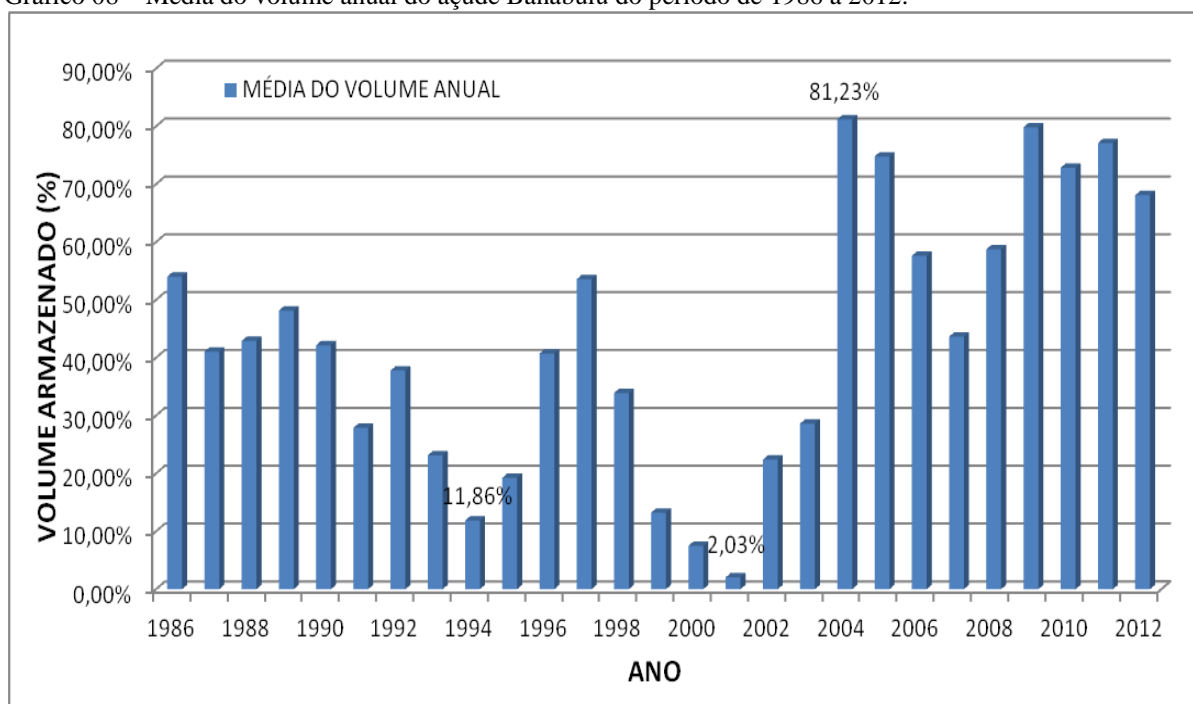
Na categoria de águas superficiais dos municípios, destacam-se os açudes Quixeramobim e Banabuiú (Arrojado Lisboa), e os rios Quixeramobim e Banabuiú. De acordo com o Atlas da Secretaria de Recursos Hídricos (SRH) do Estado do Ceará, a Bacia Hidrográfica do Rio Banabuiú ocupa uma área de aproximadamente 19.810 km². Dada a sua extensão, ocorrem ao longo dessa Bacia variações em termos litológicos, morfológicos, nos tipos de vegetação, nos solos e na própria rede hidrográfica.

O rio Banabuiú, que é perenizado pelo açude Banabuiú, é o mais importante rio desta Bacia, e desenvolve-se no sentido oeste-leste, percorrendo um curso total de 314 km, até desaguar no rio Jaguaribe nas proximidades da cidade de Limoeiro do Norte. Este rio tem como principais afluentes pela margem esquerda os rios Patu, Quixeramobim e Sitiá e pela margem direita destaca-se apenas o riacho Livramento (Figura 05).

De acordo com CEARÁ, *op. cit.*, esta Bacia caracteriza-se pelo grande número de açudes, possui um total de 5.825 reservatórios, e destes, 1.415 apresentam área superior a 05 ha. Dentre os quais, destaca-se o açude Banabuiú, responsável por mais de 50 % do volume de acumulação da bacia. Este açude possui uma vazão regularizada total de 11,61 m³/s com 90 % de garantia, isto é, com os reservatórios atendendo à demanda em 90 % dos meses.

O açude Banabuiú, construído em 1966, tem a capacidade de armazenar um volume de 1.601.000.000 m³ de água, e desde dezembro de 1985 é monitorado pela COGERH e, de acordo com a mesma, seu volume já chegou a 93,8 % em agosto de 2004 e 0,6 % em janeiro de 2002, médias mensais do período de 1986 a 2012. O ano de 2001, com média de volume anual de 2,03 %, é considerado o ano de menor volume armazenado, e o ano de 2004 com média de volume anual de 81,23 % é considerado o ano de maior volume armazenado da série histórica de 1986 a 2012 (Gráfico 08).

Gráfico 08 – Média do volume anual do açude Banabuiú do período de 1986 a 2012.



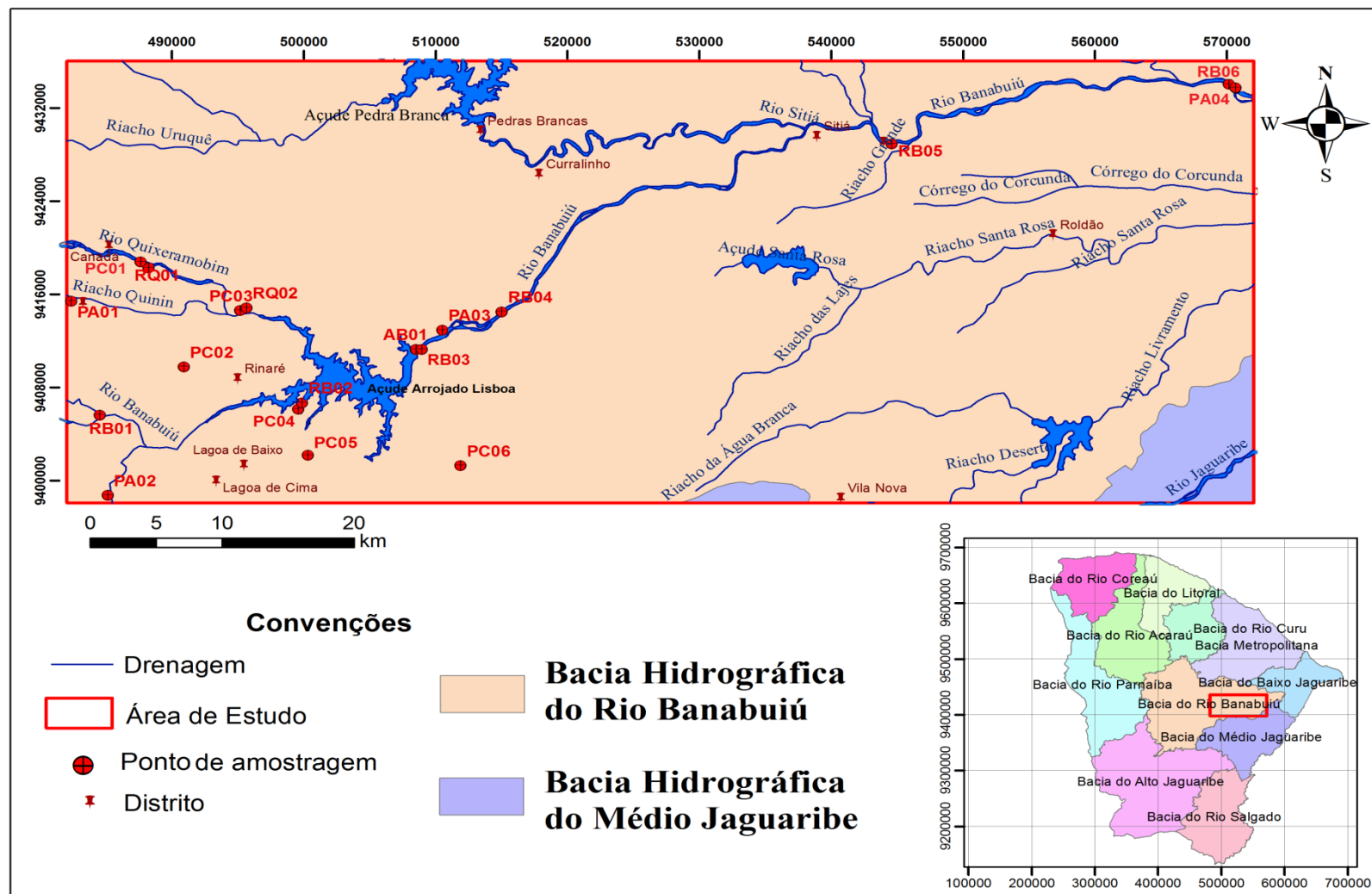
Fonte: COGERH (2013).

A demanda hídrica humana para a Bacia Hidrográfica do Rio Banabuiú corresponde a 10.157.133 m³/ano e a 2,69 % da demanda para o Estado do Ceará. Os estudos realizados referem-se somente às demandas urbanas, concentradas nas cidades, tendo em vista que as rurais, dispersas no território, são atendidas, em geral, por reservatórios com capacidade inferior a 10.000.000 m³ ou por poços, o mesmo ocorrendo para a demanda animal.

Para a demanda industrial a Bacia Hidrográfica do Rio Banabuiú apresenta uma necessidade de 7.390.448 m³/ano, o que corresponde a 3,87 % da demanda estadual. Para irrigação, tem-se uma demanda de 275.922.000 m³/ano; e 261.432.000 m³/ano para atendimento aos perímetros públicos, com área total de 14.524 ha e 25.615.000 m³/s para perímetros privados, com área total de 1.433 ha (CEARÁ, 2009, p. 33).

Portanto, Ceará, *op. cit.*, observou que a demanda hídrica para a Bacia Hidrográfica do Rio Banabuiú se divide principalmente em demanda para irrigação (94 %), demanda para indústria (3 %) e demanda para humanos (3 %).

Figura 05 – Mapa das águas superficiais da Bacia Hidrográfica do Rio Banabuiú – Ceará.



Fonte: Base Cartográfica do Serviço Geológico do Brasil – CPRM (2003).

3.15.2 Águas Subterrâneas e Aspectos Hidrogeológicos

Dada a insuficiência de recursos hídricos superficiais, em algumas áreas, adotam-se como alternativas para irrigação e abastecimento os mananciais hídricos subterrâneos, através de captação por poços amazonas (poços de grandes diâmetros, 40” ou mais, escavados manualmente e revestidos com tijolos ou anéis de concreto), tubulares profundos (obras de engenharia geológica, executadas com sonda perfuratriz mediante perfuração vertical com diâmetro de 4” a 36” e profundidade maior que 50 metros), tubulares medianamente profundos (mesma definição de tubulares profundos, no entanto, com uma profundidade entre 20 e 50 metros) e tubulares rasos (mesma definição de tubulares profundos, no entanto, com uma profundidade menor que 20 metros).

Ceará (2009) mostrou a existência de 2.900 pontos d’água na Bacia Hidrográfica do Rio Banabuiú, sendo: 2.624 poços tubulares; 272 poços amazonas; e 04 fontes naturais, captando água tanto em rochas sedimentares como cristalinas. Por conseguinte, quantificou e caracterizou as captações de água subterrânea nesta Bacia, com dados do cadastro dos pontos d’água da CPRM (SIAGAS) e nos cadastros de poços da FUNCEME (Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos), SOHIDRA (Superintendência de Obras Hidráulicas), COGERH (Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos), DNOCS (Departamento Nacional de Obras Contra as Secas), FUNASA (Fundação Nacional de Saúde), SDR (Secretaria de Desenvolvimento Rural) e empresas privadas, até 2006.

Na área de estudo tem-se os aquíferos sedimentares inconsolidados (Depósitos Aluvionares), que se apresentam de forma estreita (média de 300 m) ao longo dos rios Quixeramobim e Banabuiú. No entanto, se caracterizam como mais importantes por possuírem uma porosidade primária e uma elevada permeabilidade assegurada pelo material arenoso. Fetter (1994) menciona que em areia bem selecionada tem-se uma permeabilidade (k) que varia entre 10^{-8} a 10^{-6} cm^2 , traduzindo-se em unidades geológicas com excelentes condições de armazenamento e fornecimento d’água.

Segundo Ceará, *op. cit.*, para a Bacia Hidrográfica do Rio Banabuiú, os aquíferos aluvionares (1.169 poços) estão representados por depósitos sedimentares areno-argilosos recentes ao longo de seus rios e riachos, os quais, mesmo ocupando um pequeno pedaço da área, representam os seus principais aquíferos tendo uma importância alta do ponto de vista hidrogeológico, principalmente para o abastecimento das populações difusas.

Moura (2008) utilizando as sondagens elétricas verticais e correlacionando-as com as sondagens à percussão, estimou as espessuras das unidades geológicas do aluvião do rio

Banabuiú, trecho entre Morada Nova e Limoeiro do Norte, e mostrou uma heterogeneidade na espessura destas unidades. O autor destacou a heterogeneidade dos depósitos aluvionares, que possui camadas distintas, desde uma argila com baixa resistividade na base, de espessura média de 24,3 m, passando por arenitos finos e médios, de espessura média de 36,75 m, que é a parte da formação com maior capacidade para armazenar e liberar água, no topo ocorrem sedimentos secos e incosolidados, com espessura média de 1,03 m. A camada argilo-arenosa e argilosa ocorre tanto no topo, quanto na base do aluvião do rio Banabuiú, esta alternância é coerente com a dinâmica de um rio em que a deposição ocorre em períodos de cheia e de estiagem, resultando em camadas de sedimentos grossos e finos.

A profundidade dos poços é, em média, 9,30 m e 59,76 % destes têm profundidade inferior a 10,00 m. A vazão tem valor médio de 24,03 m³/h, vazões superiores a 2,00 m³/h foram constatadas em 91,00 % dos poços e não existem vazões inferiores a 0,50 m³/h nos mesmos.

Os aquíferos fissurais (fraturados) representados por rochas do embasamento cristalino Pré-Cambriano ocupam 96,53% da área da Bacia Hidrográfica do Rio Banabuiú, e graças à sua distribuição espacial são de grande importância para o abastecimento das populações interioranas, principalmente as difusas.

A análise dos dados de 1.455 poços tubulares nestes aquíferos mostra que em relação à profundidade, possui uma média igual a 61,15 m e 68,25 % dos poços são de profundidade maior ou igual a 60,00 m. Em relação à vazão, os valores médios são da ordem de 1,98 m³/h, vazões superiores 2,00 m³/h ocorrem em 29,93 % dos casos e inferiores a 0,50 m³/h em 34,65 % (CEARÁ, 2009, p. 30).

O domínio hidrogeológico cristalino apresenta um baixo potencial hidrogeológico, pois encontra-se inserido em áreas de rochas do embasamento cristalino, sendo as zonas de fraturas os únicos condicionantes da ocorrência d'água nestas rochas. A recarga destas fraturas pode ocorrer através das chuvas (recarga direta), e/ou dos rios e riachos que estão encaixados e/ou conectados a estas estruturas, esta possibilidade pode acontecer somente no período chuvoso.

Segundo COSTA *et al.* (1998), a porosidade dessas rochas do domínio hidrogeológico cristalino é de ordem secundária, regulada pelas fissuras das rochas. A permeabilidade e o coeficiente de armazenamento estão associados à extensão, grau de abertura e conexão das fraturas (ou fissuras). A permeabilidade fissural depende muito da origem da deformação, ou seja, do tipo de esforço e conseqüente movimento dos blocos quebrados. As fraturas tracionais tendem a ser mais abertas do que as de cisalhamento, o que condicionará maior ou menor aptidão para atuar a rocha como reservatório de água.

4 METODOLOGIA E LEVANTAMENTO DE DADOS

4.1 Cadastro dos Pontos de Amostragem (Poços e Águas Superficiais)

Foi efetuado um cadastro a partir de um banco de dados de poços, pesquisado em campo para este estudo e obtido pelos órgãos públicos responsáveis (CPRM, SRH e COGERH). Dentro dos limites da área de estudo foram encontrados 32 poços cadastrados.

Na análise do cadastro da área de estudo, verificou-se que: 04 estavam sem informação, 04 foram caracterizados como secos, 03 foram dados como fechados, 10 tinham suas situações como “não instalados”, 05 foram dados como abandonados e 06 foram caracterizados como equipados. Portanto, já na análise do cadastro foram descartados 68,8 % dos poços, ou seja, 22 poços (secos, fechados, não instalados e abandonados). Mesmo descartados previamente, todos foram visitados em campo para averiguação. Logo se observou que realmente a maioria dos poços, ou seja, 26 poços (81,3 %) cadastrados nos órgãos, estava desativada por diversos problemas, o que não possibilitou uma maior coleta de dados de água subterrânea na região, principalmente uma maior coleta em poços dos aluviões. Contudo, conseguiu-se fazer o cadastro de mais 04 poços, 01 no domínio hidrogeológico cristalino (PC01) e 03 nos aquíferos aluvionares (PA01, PA02 e PA03).

Foram, ainda, localizados os poços em condições técnicas (em uso) para amostragem. No entanto, foram escolhidos apenas poços localizados estrategicamente para uma melhor eficácia do estudo, no caso dos poços aluvionares, estes eram os existentes na época em que se iniciaram as coletas, em julho de 2010. Já os poços escolhidos do domínio hidrogeológico cristalino, foram aqueles próximos às águas superficiais. No caso dos pontos de amostragem das águas superficiais, estas foram escolhidas para uma melhor representatividade espacial, juntando a isto a proximidade com os poços estudados, pois assim, poder-se-ia estudar a possibilidade de interação rios/aquíferos através das mudanças isotópicas das águas.

A pesquisa de campo para a realização do cadastro dos pontos de amostragem (Tabela 10 e Figura 06) ocorreu em 2010, para isto foram efetuadas 02 viagens de campo (julho e outubro), procurando poços cadastrados e não cadastrados pelos órgãos responsáveis, e melhores pontos de amostragem das águas superficiais.

Mesmo com a ficha técnica de alguns poços, procurou-se obter as informações observadas em campo, como coordenadas, geologia e informações dos proprietários com relação à profundidade do poço.

Tabela 10 – Pontos de amostragem.

Amostras	Ponto de Amostragem	Localidade	Coord. N	Coord. E	Proprietário	PROF. (m)
AB01	Açude Banabuiú	Banabuiú	508516	9411266	S.I.	S.I.
PA01	Poço Amazonas Aluvionar	Belém de Cima – Banabuiú	482374	9415410	Antonio Claudiano de Oliveira	01,50
PA02	Poço Aluvionar	Cosmos Paz – Banabuiú	485156	9398730	Antonio Ferreira da Silva	04,75
PA03	Poço Aluvionar	Monte Alegre – Banabuiú	510522	9412926	Raimundo Ivan do Amaral	02,50
PA04	Poço Aluvionar	Castelo – Morada Nova	570137	9434045	Maria da Graça	15,00
PC01	Poço do DHC	Freitas/Distrito Belém – Banabuiú	488242	9418274	Francisco de Sousa Leite	60,00
PC02	Poço do DHC	Novo Oriente – Banabuiú	490903	9409757	Francisco de Assis Silva	62,00
PC03	Poço do DHC	Jiqui – Banabuiú	495198	9414600	Antonio Marcos/"Marquinhos"	78,00
PC04	Poço do DHC	Malhada Grande – Banabuiú	499575	9406113	Francisca Alves	60,00
PC05	Poço do DHC	Santa Fé – Banabuiú	500288	9401984	Comunidade de Santa Fé	78,00
PC06	Poço do DHC	Água Verde – Banabuiú	511893	9401269	Antonio Rodrigues	S.I.
RB01	Rio Banabuiú	Coque – Banabuiú	484550	9405628	S.I.	S.I.
RB02	Rio Banabuiú	Malhada Grande – Banabuiú	499863	9406678	S.I.	S.I.
RB03	Rio Banabuiú	Banabuiú	508952	9411244	S.I.	S.I.
RB04	Rio Banabuiú	Laranjeiras – Banabuiú	515015	9414478	S.I.	S.I.
RB05	Rio Banabuiú	Lagoa Grande – Morada Nova	544583	9428902	S.I.	S.I.
RB06	Rio Banabuiú	Próximo ao balneário – Morada Nova	570666	9433742	S.I.	S.I.
RQ01	Rio Quixeramobim	Freitas/Distrito Belém – Banabuiú	487637	9418786	S.I.	S.I.
RQ02	Rio Quixeramobim	Jiqui – Banabuiú	495669	9414834	S.I.	S.I.

Fonte: O autor.

Coord.: Coordenadas.

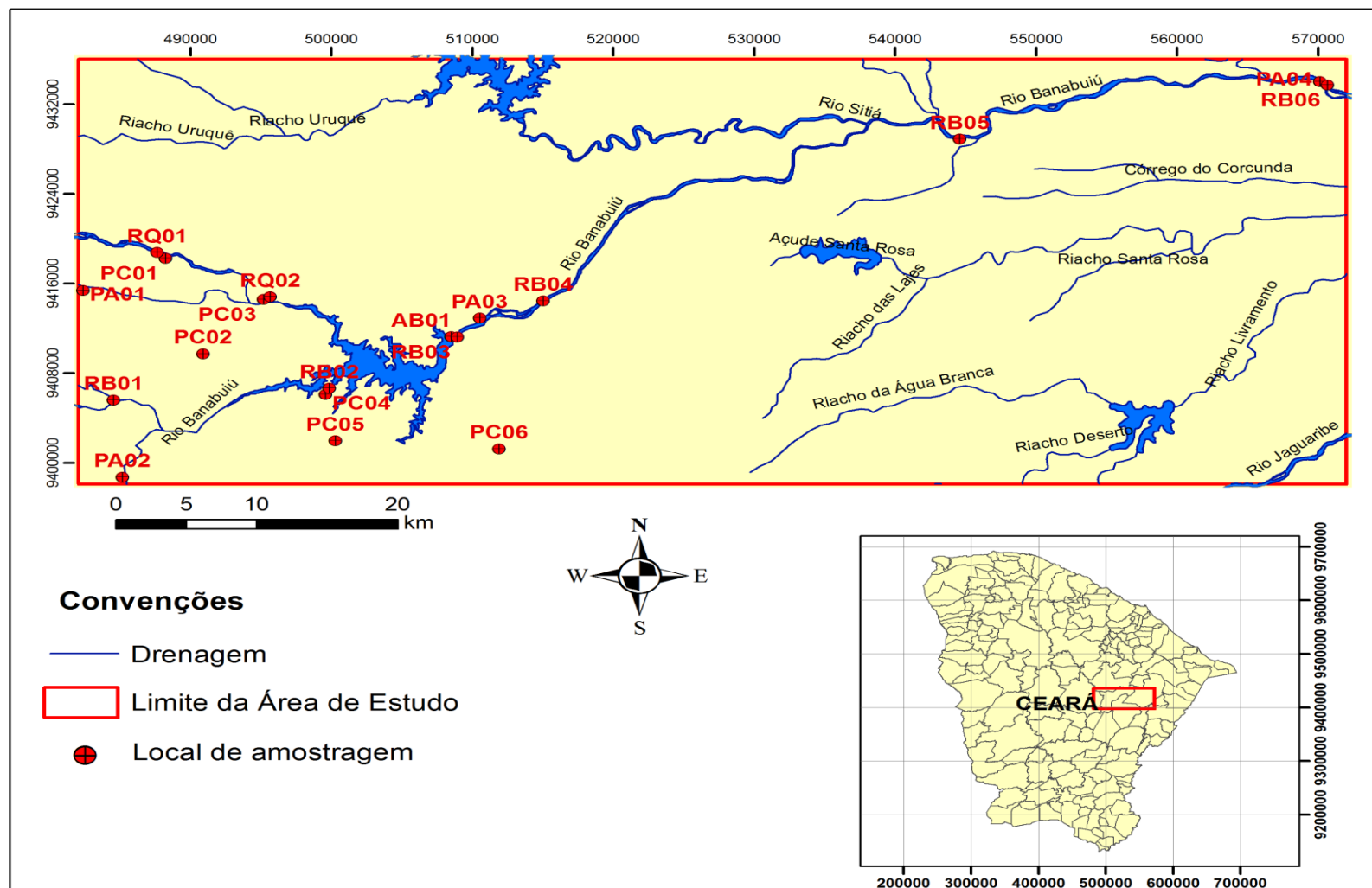
PROF.: Profundidade dos poços.

DHC: Domínio Hidrogeológico Cristalino.

S.I.: Sem Informação.

Haviam sido cadastrados pelos órgãos responsáveis 127 poços tubulares, mas neste estudo trabalhou-se com 10 poços (06 no domínio hidrogeológico cristalino e 04 nos aquíferos aluvionares) e 09 pontos de amostragem de águas superficiais (01 no açude Banabuiú, 06 no rio Banabuiú e 02 no rio Quixeramobim). Os pontos de amostragem foram cadastrados e georreferenciados com GPS (*Global Positioning System*/Garmin), e em laboratório plotados na base cartográfica da CPRM, na escala de 1:50.000, utilizando-se os aplicativos Excel XP e ArcGis 9.3.

Figura 06 – Mapa de localização dos pontos de amostragem.



Fonte: Base Cartográfica do Serviço Geológico do Brasil – CPRM (2003).

4.2 Elaboração do Mapa Potenciométrico

A elaboração de um mapa potenciométrico representa um dos principais estudos de natureza hidrogeológica física a ser desenvolvido numa determinada área de ocorrência de um aquífero. Através desse mapa, possibilita-se o conhecimento de zonas de convergência (sumidouros), divergência (fontes de alimentação) e trânsito do aquífero, sentido do fluxo subterrâneo principal e fluxos secundários, áreas com maior ou menor transmissividade, dentre outras informações não menos importantes.

As flutuações da superfície potenciométrica num determinado tempo permitem estudar a variação das reservas, a alimentação dos aquíferos e sua observação e controle são importantes para a conservação dos recursos em águas subterrâneas (CASTANY, 1975, p. 90, tradução nossa).

Os mapas de superfície potenciométrica foram realizados com poucos locais de observação (considerando a área estudada), mas distribuídos em toda região. Para se obter informações mais detalhadas do movimento da água, baseado apenas nos mapas potenciométricos, necessitar-se-ia de um número maior de pontos de observação.

A metodologia de trabalho compreendeu os procedimentos clássicos e um procedimento de adaptação (geração de *buffers*) aplicados na elaboração de mapas potenciométricos para a região estudada. Os *buffers*, aqui estudados, são perímetros criados em torno dos pontos de amostragem para englobar apenas os aluviões, não extrapolando os dados para o domínio hidrogeológico cristalino.

O mapa potenciométrico foi preparado em ambiente digital, a partir dos dados dos pontos de água nos aquíferos aluvionares, dos rios e das SEVs, pois não faria sentido trabalhar com dados do domínio hidrogeológico cristalino devido à falta de conexão entre as fraturas dos mesmos (hipótese não comprovada).

Foram obtidas as medidas do nível estático (NE) e da cota altimétrica (z) dos pontos de amostragem, pois como os dados dos aquíferos aluvionares foram apenas de 04 poços, as medidas dos rios Quixeramobim e Banabuiú, juntamente com os dados da geofísica realizada, supriram a necessidade de mais poços no aluvião, isto considerando os sistemas aluvionares livres, isotrópicos e homogêneos.

4.2.1 Níveis Estáticos

A medição do nível estático foi realizada com um medidor de nível com sinal sonoro, do tipo Altronic com 100 metros de comprimento. A medida foi feita da boca do poço até o nível d'água, subtraindo-se a altura da boca do poço.

4.2.2 Determinação dos Dados Planialtimétricos

Para a determinação das coordenadas planialtimétricas E, N e H de todos os pontos de amostragem de trabalho (poços, açude e rio), foram utilizados receptor GPS, geodésico, de uma frequência (L1), de precisão 5 mm + 1 ppm, ou seja, um erro máximo calculado de 15 mm. Foi utilizado o RN de Banabuiú da Rede de Nivelamento de Precisão do IBGE.

Adotou-se o método de posicionamento estático com taxa de rasteio de 5 segundos e tempo de ocupação nas estações de 10 minutos. O programa utilizado no processamento dos dados foi o Ashtech Solution 2.6.

4.2.3 Utilização do Software Surfer 8.0

A elaboração do mapa potenciométrico foi realizada a partir do levantamento planialtimétrico e medições de níveis estáticos dos poços cadastrados e das SEVs. Para a interpolação de dados, utilizou-se o procedimento de *krigagem*, com modelo de variograma linear usando um *grid* de 02 m x 02 m.

A krigagem é um método que permite estimar o valor desconhecido associado a um local qualquer, de uma determinada área ou volume, a partir de um conjunto de n dados $\{Z(x_i), i=1,n\}$ disponíveis.

O objetivo da krigagem é buscar o melhor conjunto de ponderadores, de tal modo que a variância do erro seja a mínima possível. Trata-se, portanto, de encontrar o mínimo da função variância do erro.

A carga hidráulica (h) é a soma de duas parcelas: a carga de elevação, z (altitude do local) e carga de pressão, P/γ (metros de coluna de água acima do local). No caso do aquífero livre, a carga na superfície livre (é igual à pressão atmosférica) corresponde à coluna da água ($h = z$), ou seja, $h = z - NE$. Portanto, a malha de potenciais da área foi obtida por subtração do nível estático da altitude, calculados diretamente. Para o traçado das linhas de isotencial utilizou-se a ferramenta de *spline* para o procedimento de suavização.

Os vetores do gradiente hidráulico foram obtidos aplicando-se a função mapa vetorial sobre a malha de interpolação de carga hidráulica através do *Software Surfer 8.0*.

Para não extrapolar os dados gerados dos aluviões para o domínio hidrogeológico cristalino resolveu-se criar *buffers* para os pontos de amostragem, assim, os vetores (setas) do gradiente hidráulico foram gerados apenas para cada ponto de amostragem.

4.3 Caracterização Geométrica

Para a caracterização geométrica das camadas geológicas (sedimentos) da área de estudo utilizou-se as sondagens elétricas verticais (SEVs), que forneceram valores para as espessuras dos aluviões que permitiram a estimativa da reserva permanente dos mesmos.

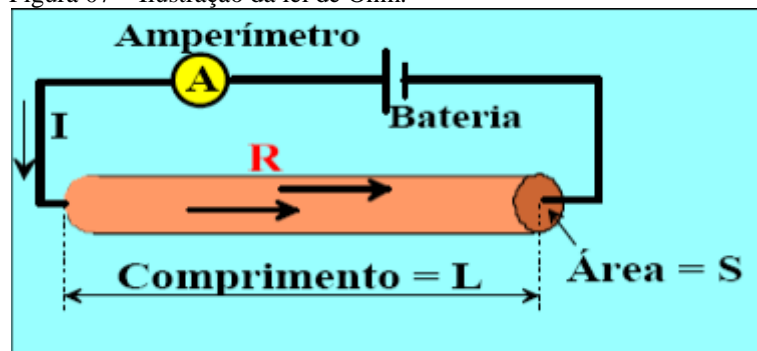
Segundo Feitosa e Manoel Filho *et al.*, (2000), a água subterrânea, como o petróleo, não é pesquisada diretamente pela geofísica. São pesquisados, antes, os litotipos e estruturas favoráveis ao acúmulo e circulação do bem procurado. Considerando, entretanto, as características particulares do problema, bem como os aspectos de ordem econômica, o método de resistividade elétrica em corrente contínua (SEVs e perfis de resistividade) são, classicamente, os mais utilizados em áreas sedimentares.

De acordo com Tucci (1993), o método da resistividade elétrica baseia-se no fato de que, em geral, terrenos diferentes (sedimentares e cristalinos) apresentam resistividades elétricas também diferentes. O desenvolvimento deste método processa-se a partir do estudo do campo elétrico de potenciais, criado artificialmente pela injeção no terreno de uma corrente elétrica, e relacionando-o depois com as características geológicas do local. Esse estudo tem por finalidade a determinação da resistividade elétrica dos terrenos investigados pela prospecção, num local ou em vários locais da superfície do terreno, e o conhecimento da sua repartição segundo a profundidade.

De acordo com Feitosa *et al. in:* Feitosa *et al.* (2008), este método da eletrorresistividade baseia-se fundamentalmente na Lei de Ohm (Figura 07), descoberta experimentalmente pelo alemão Georg Simon Ohm (1789 – 1854). Esta lei expressa a proporcionalidade direta entre a corrente elétrica (i) num condutor metálico e a diferença de potencial (ΔV) entre seus terminais, conforme indicado na Equação 01, onde R é a resistência do material e L o comprimento do condutor.

$$i = (L/R) \Delta V \quad (01)$$

Figura 07 – Ilustração da lei de Ohm.



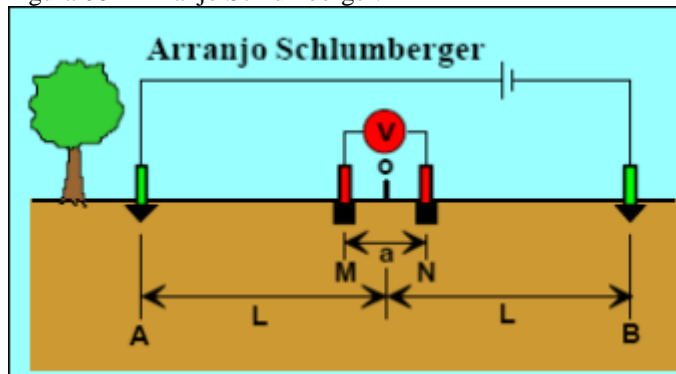
Fonte: Braga (2006).

4.3.1 Levantamento Geofísico

Nos arranjos de campo mais utilizados na execução da técnica da SEV, colocam-se quatro eletrodos na superfície do terreno, dispostos simetricamente em relação ao centro “o” e sobre uma mesma reta.

O arranjo Schlumberger (Figura 08), além de ser mais prático no campo, sendo necessário o deslocamento de apenas dois eletrodos, as leituras nos equipamentos são menos sujeitas às interferências produzidas por ruídos indesejáveis, tais como, potenciais artificiais produzidos por cabos e estações de alta tensão.

Figura 08 – Arranjo Schlumberger.



Fonte: Braga (2006).

Neste tipo de arranjo, enquanto os eletrodos de A e B apresentam uma separação crescente (L), em relação ao centro (o), os eletrodos de potencial M e N permanecem fixos durante o desenvolvimento do ensaio. A ideia básica deste arranjo é fazer com que a distância “a”, que separa os eletrodos M e N, tenda a zero em relação à distância crescente entre A e B. O erro produzido por esse tipo de arranjo, que se reflete nos dados de campo (em função dos ajustes necessários nas equações gerais básicas) pode ser considerado insignificante, não se traduzindo em desvantagem (visando minimizar este erro, adota-se a relação: $MN \leq AB/5$) (BRAGA, 2006, p. 22).

O valor da resistividade aparente – ρ_a (ohm.m) é calculado a partir da Equação 02:

$$\rho_a = K \cdot (\Delta V / I) \quad (02)$$

onde, simplificando a Equação Geral do coeficiente geométrico K, tem-se a Equação 03:

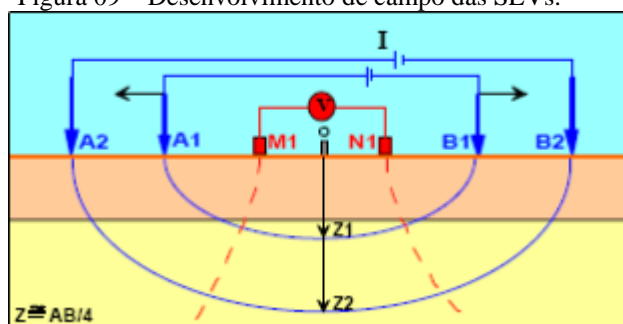
$$K = \pi \cdot (AM \cdot AN) / MN \quad (03)$$

4.3.2 Desenvolvimento dos Trabalhos de Campo

O trabalho de campo ocorreu durante 03 dias (junho de 2012), sendo este mês escolhido por ter sido um período seco (mesmo em época de chuva) para não atrapalhar as sondagens elétricas verticais com falsos valores de resistividade. Realizou-se 12 SEVs, sempre nos aluviões dos rios Quixeramobim (01 SEV) e Banabuiú (11 SEVs). Com base nestas sondagens, as espessuras da cobertura aluvionar e dos aquíferos aluvionares foram estimadas.

O desenvolvimento de campo das SEVs iniciou-se pela escolha do local exato do centro da linha AMNB; neste local colocou-se uma estaca identificando o número da sondagem. Ao aumentar-se a distância entre os eletrodos de corrente A e B, o volume total da subsuperfície incluída na medida também aumenta, permitindo alcançar camadas cada vez mais profundas (Figura 09). Os resultados sucessivos estão, portanto, ligados com variações das resistividades aparentes e/ou cargabilidades aparentes com a profundidade.

Figura 09 – Desenvolvimento de campo das SEVs.



Fonte: Braga, *op. cit.*

Os dados obtidos destes parâmetros físicos, assim obtidos em cada SEV, foram representados por meio de curvas bilogarátmicas em função das distâncias entre os eletrodos correspondentes. Para o arranjo Schlumberger, as resistividades ρ_a (ohm.m) e M_a (mV/V) são plotadas em ordenadas, e no eixo das abscissas, as separações $AB/2$ em metros.

A utilização destas curvas bilogarátmicas, para representação e interpretação dos dados de campo se dá por que, nestes tipos de curvas, as variações das estruturas geoeletricas representativas são realçadas, além de permitirem grandes amplitudes de variação para o traçado das curvas cujos modelos são usadas na interpretação.

A profundidade de investigação de uma SEV é governada, principalmente, pelo espaçamento entre os eletrodos de corrente AB, podendo ser tomada como $= AB/4$. Esta profundidade é definida como uma profundidade teórica investigada, pois, dependendo dos contrastes entre, por exemplo, as resistividades das camadas geoeletricas, na prática, esta relação pode ser alterada (BRAGA, 2006, p. 23).

Segundo Braga (2006), para se efetuar uma correlação adequada com a geologia, em uma determinada área de estudo, é fundamental a localização geográfica e o entendimento da geologia local em termos estratigráficos. Entretanto, para a interpretação dos dados do método da eletrorresistividade, alguns critérios para efetuar a associação resistividade/litologia podem ser observados e seguidos, por exemplo: a partir de dados coletados previamente (SEVs paramétricas, perfilagens elétricas, mapeamento geológico, perfis geológicos de poços confiáveis, perfis litológicos da região, etc.), o modelo final pode ser determinado.

As curvas de campo Schlumberger, que são segmentadas, foram processadas e transformadas em uma curva contínua, e, em seguida, invertidas com base na metodologia desenvolvida por Zohdy (1989) e Zohdy e Bisdorf (1989). Os programas utilizados no processamento e nas interpretações das SEVs foram os softwares ATO (ZOHDY; BISDORF, *op. cit.*) e RESIST (VANDER VELPEN, 1988). O resultado dessa interpretação é um modelo multicamada, no qual o número de camadas é igual ao número de pontos da curva de campo.

A partir do modelo multicamadas, fez-se uma redução do número de camadas compatível com a geologia disponível, obtendo-se assim estimativas iniciais das resistividades e das espessuras das várias camadas geoeletricas.

4.4 Balanço Hídrico

Balanço hídrico é um balanço de massa. A massa de água precipitada é parcelada de forma que a expressão do balanço pode ser utilizada para determinar um de seus termos, desde que sejam conhecidos os demais. Neste trabalho, o balanço hídrico foi utilizado para se obter a infiltração, e esta foi calculada adotando-se o método de Thornthwaite (1948).

O balanço hídrico de uma bacia hidrográfica também envolve a quantificação dos componentes deste sistema visando o seguinte:

- a) melhor entendimento do comportamento do sistema;
- b) utilização racional dos recursos hídricos.

O balanço hídrico tem como base a continuidade de massa e a troca de energia dos sistemas envolvidos, no tempo e no espaço. Os componentes principais deste balanço são:

a) PRECIPITAÇÃO

É toda água proveniente do meio atmosférico que atinge a superfície terrestre.

b) EVAPORAÇÃO

É o processo físico no qual um líquido passa ao estado gasoso.

c) EVAPOTRANSPIRAÇÃO

É a perda de água do solo por evaporação direta e por transpiração da planta.

Evapotranspiração potencial (ETP): perda de água por evaporação e transpiração de uma superfície totalmente coberta por vegetação de porte baixo.

Evapotranspiração real (ETR): perda de água por evaporação e transpiração em condições reais de atmosfera e umidade do solo (FRAGOSO Jr. *et al.*, 2009, p. 72).

d) ESCOAMENTO SUPERFICIAL

É a parcela da água que se desloca na superfície da bacia até encontrar uma calha definida. Quando a bacia é rural e possui cobertura vegetal, o escoamento sofre a interferência desta cobertura e grande parte infiltra.

e) INFILTRAÇÃO

Segundo Tucci (1993), é a passagem de água da superfície para o interior do solo através da percolação. Portanto, é um processo que depende fundamentalmente da água disponível para infiltrar, da natureza do solo, do estado da sua superfície e das quantidades de água e ar, inicialmente presentes no seu interior. Portanto, existem diferentes procedimentos utilizados atualmente na prática, que utilizam os componentes mencionados.

A equação do balanço hídrico é um instrumento extremamente útil e que pode ser usado de várias maneiras para estimar a magnitude e distribuição no tempo dos componentes hidrológicos citados anteriormente.

4.4.1 Recarga de Água Subterrânea

De forma geral, recarga subterrânea é considerada como a quantidade de água que contribui para aumentar a reserva subterrânea permanente ou temporária de um aquífero. É importante destacar que nem toda água infiltrada será adicionada às reservas do aquífero.

Rushton (1987) *in* Simmers (1987) denomina de **recarga potencial (infiltração total)** aquela que penetra no solo e **recarga real (infiltração eficaz)** aquela que, efetivamente, chega até o aquífero.

Rushton e Ward (1979) *apud* Vasconcelos (1999), observaram que em avaliações de recarga a partir de balanço hídrico, a infiltração eficaz é tratada como a própria variação no armazenamento subterrâneo.

Segundo Balek (1987) *in* Simmers (1987), Levando em consideração o fator tempo, identificou-se quatro tipos de recarga:

- a) Recarga curta: ocorre após grandes eventos de chuva;

- b) Recarga sazonal: ocorre durante o degelo em regiões de clima temperado ou em período chuvoso em regiões com estações secas e chuvosas bem definidas;
- c) Recarga perene: ocorre nos trópicos úmidos onde existe um fluxo contínuo de água;
- d) Recarga histórica: ocorreu há muito tempo e que foi responsável pela formação dos atuais recursos subterrâneos.

A recarga de água subterrânea pode ocorrer naturalmente de precipitação, rios, canais e lagos, e como um fenômeno induzido pelo homem através de atividades agrícolas e urbanização.

O volume de água adicionado ao aquífero por percolação vertical diretamente da precipitação através da zona não saturada é designado como recarga direta. O volume de água que percola até o aquífero advindo das demais fontes acima mencionadas recebe a designação de recarga indireta.

Segundo Rushton (1987) *in* Simmers (1987), enumerou-se alguns dos mais importantes fatores que tem influência no mecanismo de recarga: Topografia; precipitação: intensidade, duração e distribuição espacial; escoamento superficial; evapotranspiração real; irrigação e urbanismo; interação rio-aquífero; solo: natureza, espessura e propriedades hidráulicas; mecanismos de fluxo na zona não saturada; e aquífero: capacidade de receber recarga, características hidrodinâmicas e suas variações com o tempo.

Neste estudo da Bacia Hidrográfica do Rio Banabuiú procurou-se analisar principalmente a interação entre rios e aquíferos como fator de influência no mecanismo de recarga.

4.4.2 Estimativa de Recarga pelo Método do Balanço Hídrico

Segundo Eilers (2004), a estimativa de recarga de água subterrânea é um pré-requisito fundamental para estudos de gestão e planejamento de recursos hídricos, principalmente em regiões onde o uso das águas subterrâneas é um fator de desenvolvimento regional.

Foi utilizado o método do balanço hídrico para a estimativa da recarga, segundo a fórmula proposta por Thornthwaite (1948) para o cálculo da Evapotranspiração Potencial – ETP, com base nos dados que foram obtidos na estação meteorológica de Banabuiú.

A estimativa da evapotranspiração real (ETR) é calculada como o resíduo das perdas deduzidas a partir da precipitação, identificadas na forma de escoamento superficial e evapotranspiração.

Sabe-se que a lâmina precipitada (P), pode ser dividida em três parcelas: o escoamento superficial (ES), a evapotranspiração real (ETR), e a infiltração total (recarga potencial - I_T), podendo a expressão geral do balanço hídrico médio ser escrita como segue a Equação 04:

$$P = ES + ETR + I_T \quad (04)$$

De acordo com Castany (1975), a infiltração total (I_T) inclui a água retida no solo (I_r) e a água que percola no subsolo, denominada infiltração eficaz (I_e), que corresponde à parcela da precipitação que alimenta a reserva subterrânea. Esta parcela está diretamente relacionada com as flutuações da superfície potenciométrica, que refletem a variação das reservas de água subterrânea.

Ainda de acordo com Castany, *op. cit.*, no caso do balanço hídrico de aquíferos aluvionares, geralmente o escoamento superficial (ES) é insignificante por conta da morfologia do solo. No caso da área estudada, uma parte infiltra e a outra evapora. Todas estas quantidades já estão contabilizadas no balanço e, portanto, pode-se omitir o escoamento superficial (ES) e escrever a Equação 05 para a obtenção da infiltração eficaz:

$$I_e = P - ETR \quad (05)$$

Para se calcular a infiltração eficaz (I_e), é necessário conhecer a evapotranspiração potencial (ETP). A fórmula de Thornthwaite (1948) considera a altura pluviométrica e a temperatura, fornecendo a evapotranspiração potencial, por mês, em milímetros, através da Equação 06:

$$ETP = 16 (10T/I)^a K \quad (06)$$

Onde,

T = temperatura média mensal em °C

I = índice térmico anual (mm)

K = fator de correção (depende da latitude)

a = função do índice térmico

A determinação do Índice térmico é obtida através da Equação 07:

$$\sum_{i=1}^{12} I = \sum I_i \quad \text{onde, } I_i = (T_i/5)^{1,5} \quad (07)$$

I = índice térmico anual (mm)

I_i = índice térmico mensal (mm)

O valor do expoente (a) é dado pela Equação 08:

$$a = 0,49239 + 1792 \times 10^{-5} I - 771 \times 10^{-7} I^2 + 675 \times 10^{-9} I^3 \quad (08)$$

Para o valor de K, usou-se os valores correspondentes entre as latitudes 5 e 10° (VILLELA; MATTOS, 1975), já que a latitude média da região de Banabuiú é de 05°18'00".

Segundo Vasconcelos (1999), a evapotranspiração real (ETR) é o termo mais importante, porém o menos conhecido, de um balanço hídrico.

De acordo com Vasconcelos (1996), para a determinação da evapotranspiração real, o método proposto por Thornthwaite (1948) é considerado o que melhor se adapta para áreas com características climáticas que apresentam alternância de períodos secos e chuvosos bem diferenciados. No caso de aquíferos livres, especialmente em regiões de clima semiárido, constitui-se no principal termo de perda de água.

4.4.2.1 Obtenção dos Dados Pluviométricos e de Temperatura

Para a elaboração deste estudo, foi considerada uma série histórica (1988 -2012) com 25 anos de dados pluviométricos obtidos na estação de Banabuiú, e uma série de 04 anos (março de 2009 até dezembro de 2012) de dados de temperaturas da estação de Banabuiú, estação esta, operada pela FUNCEME. De acordo com ANA (2009), este posto funciona desde 1965, encontra-se nas coordenadas 9412331 S e 509233 W, e tem uma cota altimétrica de 120 metros.

4.5 Cálculo das Reservas Hídricas Subterrâneas

4.5.1 Reserva Reguladora

A reserva reguladora, também denominada reserva renovável ou recarga anual, corresponde ao volume de águas armazenadas no aquífero (neste estudo, aquífero aluvionar) na porção compreendida entre as duas posições extremas, máxima e mínima, da superfície dos níveis de água do aquífero no decorrer de um ciclo hidrológico. É, portanto, correspondente ao volume de água restituído para o meio físico exterior através dos escoamentos junto aos seus exutórios naturais no decorrer do período considerado. Assim, o volume da reserva foi calculado através do método do balanço hídrico.

4.5.2 Reserva Permanente

A reserva permanente (R_p) é o volume de água armazenada no aquífero, abaixo da superfície mínima de variação periódica dos níveis de água. Para a estimativa da reserva dos aquíferos aluvionares foram consideradas as suas características dimensionais e hidrodinâmicas.

As reservas permanentes foram calculadas utilizando-se a Equação 15:

$$R_p = A \times b \times S_y \quad (15)$$

onde A é a área de ocorrência do sistema aquífero (m^2), b é a espessura média saturada (m), e S_y é a porosidade efetiva (adimensional), este dado é oriundo de um estudo realizado no aquífero aluvionar do Perímetro Irrigado de Morada Nova por Maia (2009).

Através das SEVs realizadas na Bacia Hidrográfica do Rio Banabuiú, trecho entre Quixeramobim e Banabuiú, pode-se conhecer a espessura dos aluviões (b).

4.6 Hidroquímica

O trabalho de coleta (águas de poços e águas superficiais) ocorreu durante 02 anos (julho de 2010 a abril de 2012), para isto foram efetuadas 08 viagens de campo, uma a cada três meses, num total de 24 dias, percorrendo por volta de 3000 km de carro em piçarra somente na área de estudo, trabalhando-se em média 10 horas por dia, isto tudo para manter o máximo possível de uma continuidade do monitoramento das águas estudadas. A amostragem foi realizada através de coletores (tipo *bailer*), armazenadas em frascos de polietileno e vidros âmbar (para análise de nitrogênio amoniacal) e acondicionadas a 04 °C para preservação das amostras.

As 19 amostras por período de coleta (total de 152 amostras) foram submetidas a análises físico-químicas (total de 2280 análises), sendo realizadas no Laboratório de Geoquímica do Departamento de Geologia da UFC. Os procedimentos dos métodos empregados nas análises estão descritos no *Standard Methods for the examination of water and wastewater* (APHA, 2001).

Potencial Hidrogeniônico – pH

O método empregado foi o eletrométrico, utilizando-se um potenciômetro portátil de marca Corning, modelo pH-30, com temperatura compensada.

Condutividade Elétrica – CE

O equipamento utilizado foi um condutivímetro portátil de marca Digimed, modelo DM-3, com temperatura compensada.

Alcalinidade Total

O método empregado na determinação da alcalinidade foi o Titulométrico por indicadores (fenolftaleína e metilorange). As medidas de alcalinidade foram usadas para determinar concentrações de bicarbonato (HCO_3^-) e carbonato (CO_3^{2-}).

Cálcio – Ca^{++}

O método de determinação baseou-se na titulação com ácido etilenodiamino tetraacético (EDTA). Usando tampão de pH 12 e indicador Murexida. Os resultados das análises foram usados na quantificação do cálcio (Ca^{2+}).

Dureza Total

O método de determinação baseou-se na titulação com EDTA. Usando tampão 10 e indicador eriocromo T. Das medidas de dureza total e dureza do cálcio obteve-se, por diferença, a concentração de magnésio (Mg^{2+}).

Cloreto – Cl^-

A determinação do cloreto (Cl^-) seguiu o método de Mohr, o qual consistiu na precipitação do íon cloreto pelo nitrato de prata na presença de cromato de potássio.

Sódio e Potássio – Na^+ e K^+

Foram determinados por fotometria de chama, através da emissão de radiação característica decorrente de excitação de seus átomos para o estado fundamental. O fotômetro usado foi o de marca Analyser, modelo 910.

Sulfato – SO_4^-

O método empregado foi o turbidimétrico, que consiste na precipitação do íon sulfato em meio ácido com cloreto de bário. A absorbância da suspensão de sulfato de bário foi lida no espectrofotômetro de marca Thermo Scientific, modelo Evolution 300 UV-VIS, o qual foi também usado nas análises de ferro, nitrato e sílica.

Sílica

A sílica solúvel (reativa) foi determinada pelo método molibdosilicato. O molibdato de amônio em meio ácido reage com a sílica e fosfatos produzindo heteropoliácidos. O ácido oxálico foi adicionado para destruir o ácido molibdofosfórico.

Ferro Total

Na determinação do ferro total ($\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+}$) foi empregado o método da ortofenantrolina, que se baseia na redução do ferro a íon ferroso (Fe^{2+}) por ebulição em meio ácido pela ação de um agente redutor.

Fluoreto – F^-

Nesta determinação foi empregado o método do eletrodo de íon seletivo. O eletrodo de fluoreto usado foi o de marca Thermo Orion, acoplado a um potenciômetro de marca Thermo Orion 4 Star.

Nitrato e Nitrito - N-NO_3^- e N-NO_2^-

A análise do nitrato seguiu o método da coluna redutora de cádmio. Passando a amostra através de uma coluna redutora de cádmio/cobre, os íons nitrato foram reduzidos a nitrito, obtendo-se $\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$. Por subtração da concentração de nitrito, que foi determinada pelo método da diazotização, foi obtida a concentração em nitrato.

Nitrogênio Amoniacal

O método usado determina a totalidade de nitrogênio amoniacal, ou seja, $\text{N-NH}_3 + \text{N-NH}_4^+$, simbolizado por $\text{N-NH}_{3,4}$. Baseia-se no método de Koroleff (1969) *apud* Niencheski (2006), que consiste na formação de um composto de cor azul formado pela reação da amônia com hipoclorito e fenol, sendo estável por mais de 24h. O hipoclorito foi substituído por dicloisocianurato de potássio, conforme Aminot e Chaussepied (1983) *apud* Niencheski, *op. cit.* Os reagentes foram adicionados imediatamente após a coleta, em campo, e as amostras, com os reagentes, foram mantidas ao abrigo da luz até a chegada ao laboratório para leitura da absorbância a 630 nm.

4.6.1 Tratamento Hidroquímico

As análises físico-químicas passaram por um tratamento estatístico (cálculo do balanço iônico) com auxílio do software desenvolvido, principalmente, para interpretação gráfica de dados hidroquímicos através do programa QUALIGRAF, criado por Möbus (2003). Com base nesses dados que foram obtidos nas análises das respectivas amostras, foram caracterizadas as águas utilizando-se os diagramas de Piper e do Laboratório de Salinidade dos Estados Unidos (USSL), que permitem a classificação iônica da água para fins de irrigação.

4.6.2 Balanço Iônico

Como os solutos maiores na água subterrânea são espécies carregadas positivamente e negativamente, a água deve ser eletricamente balanceada. É de grande importância para os resultados da pesquisa hidroquímica uma verificação da acuracidade das análises físico-químicas. Para isto foi utilizada uma fórmula empírica para cálculo do balanço iônico, onde os valores dos íons dados em mg.L⁻¹ são convertidos em meq.L⁻¹.

O balanço iônico consiste na comparação da soma das cargas positivas com a soma das cargas negativas dos íons, portanto é utilizado para avaliar a qualidade das análises químicas realizadas em laboratório, a partir daí selecionam-se as melhores. Entretanto, além dos erros cometidos no laboratório, existe a possibilidade também de ocorrer precipitações de minerais no recipiente da amostra coletada, causando um desequilíbrio iônico. E de acordo com o método de Logan (1965), que considerou o erro teórico igual ao erro prático máximo permitido, a Equação 09 e o Quadro 01 abaixo são usados para calcular o erro prático da análise. Este cálculo do erro para cada amostra foi processado pelo programa QUALIGRAF. Foi admitido um erro máximo de 10 %, amostras com erros maiores foram descartadas

$$\text{Erro (\%)} = \frac{\sum\left(\text{Cátions}, \frac{\text{meq}}{\text{L}}\right) - \sum\left(\text{Ânions}, \frac{\text{meq}}{\text{L}}\right)}{\sum\left(\text{Cátions}, \frac{\text{meq}}{\text{L}}\right) + \sum\left(\text{Ânions}, \frac{\text{meq}}{\text{L}}\right)} \times 100 \quad (09)$$

Quadro 01 - Erro admissível nas análises dos íons maiores.

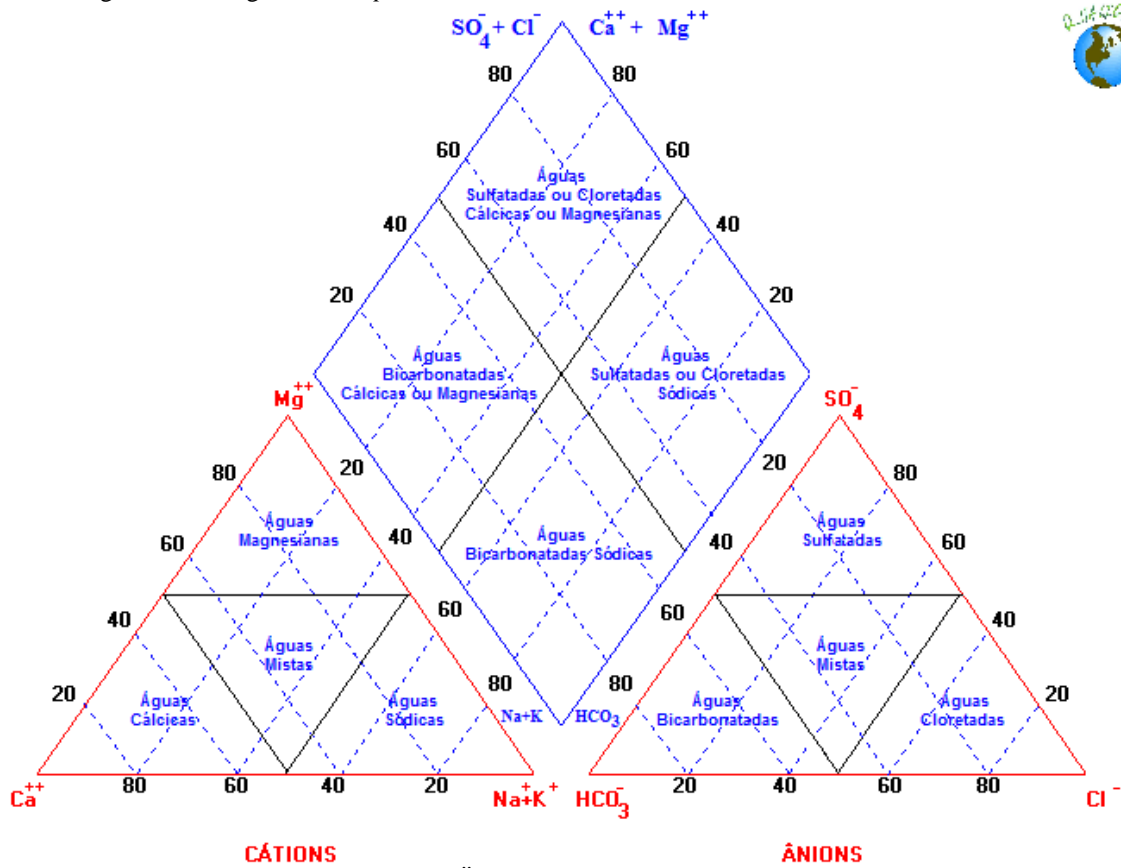
Σcátions ou Σânions (meq/L)	≤ 01	02	06	10	≥ 30
Erro (%)	10	06	04	03	≤ 02

Fonte: Logan, *op. cit.*, modificado pelo autor.

4.6.3 Diagrama de Piper

Os íons maiores nas águas foram usados para classificá-la em vários tipos, com base no cátion e ânion dominante, em cloretada sódica, bicarbonatada cálcica etc., e comparar os distintos tipos de água subterrânea com os tipos de água dos rios. Para a classificação das águas, foi usado o método *trilinear* ou Diagrama de *Piper* (Figura 10). Neste método, transformam-se as concentrações de cada íon, expressos em meq/L, em porcentagem do total de ânions e do total de cátions, separadamente.

Figura 10 – Diagrama de Piper.



Fonte: Programa QUALIGRAF (MÖBUS, 2003).

4.6.4 Classificação da Água para a Irrigação

Na classificação das águas para fins de irrigação, foi utilizado o diagrama do Laboratório de Salinidade dos Estados Unidos – USSL (RICHARDS, 1954), que se baseia na condutividade elétrica (CE) e na razão de adsorção de sódio (RAS). A razão de adsorção de sódio (RAS) é usada para avaliar a nocividade do sódio. Os valores da RAS fornecem o risco de sódio, e os da CE, o risco de salinidade. Quanto maior a condutividade elétrica e a razão de adsorção de sódio, a água se torna menos apropriada para irrigação (Figura 11).

A razão de adsorção de sódio (RAS) foi calculada mediante a utilização da fórmula em meq/l, expressa pela Equação 10:

$$RAS = \frac{rNa^+}{\sqrt{\frac{1}{2}(rCa^{++} + rMg^{++})}} \quad (10)$$

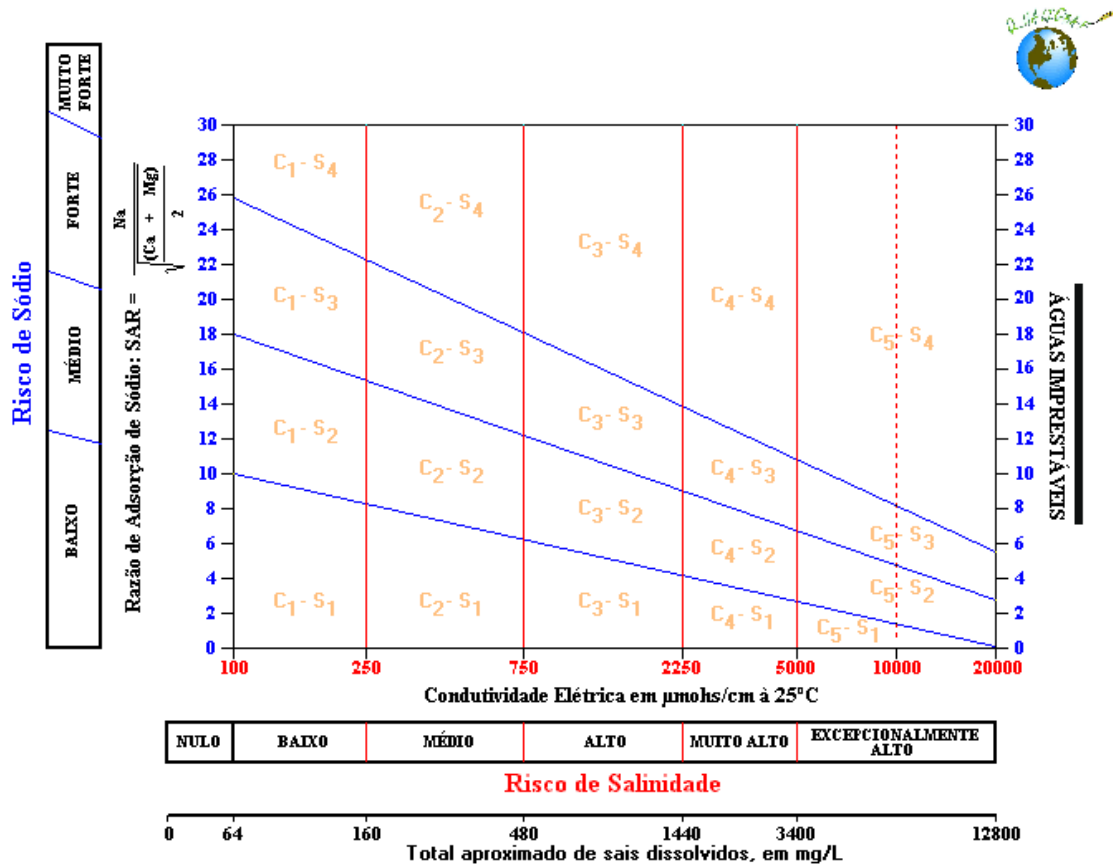
Onde,

rNa^+ : concentração de sódio em meq/L na água;

rCa^{++} : concentração de cálcio em meq/L na água;

rMg^{++} : concentração de magnésio em meq/L na água.

Figura 11 – Diagrama para classificação das águas de irrigação segundo o Laboratório de Salinidade dos Estados Unidos - USSL.



Fonte: Programa QUALIGRAF (MÖBUS, 2003).

A classificação das águas em função dos riscos de sódio e salinidade obedece às classes representadas no Quadro 02.

Quadro 02 – Classificação das águas para irrigação segundo o diagrama do Laboratório de Salinidade dos Estados Unidos – USSL.

CLASSIFICAÇÃO DAS ÁGUAS PARA IRRIGAÇÃO			
Classe	Risco de Sódio	Classe	Risco de Salinidade
S ₁	Baixo	C ₀	Muito Baixo
S ₂	Médio	C ₁	Baixo
S ₃	Alto	C ₂	Médio
S ₄	Extremamente Alto	C ₃	Alto
		C ₄	Muito Alto
		C ₅	Extremamente alto

Fonte: Richards (1954).

Esta classificação foi incluída para verificar se as águas mais salinizadas são apropriadas, ou não, para o uso na agricultura.

A avaliação dos riscos de salinização de uma determinada área mediante a água de irrigação não poderá ser realizada simplesmente pela qualidade da água, pois seus efeitos dependem das características do solo, da tolerância das culturas a serem exploradas, das condições climáticas locais e do manejo da irrigação e drenagem, além de suas características físico-químicas. Desse modo, a qualidade da água de irrigação pode ser considerada como um importante fator, mas nunca deve ser esquecido que ela é tão somente um dos fatores e que não é possível desenvolver um sistema de classificação que possa ser utilizado em todas as circunstâncias (FIGUEIRÊDO, 2005, p 11).

Segundo Vieira (2012), a principal consequência do aumento da concentração total de sais solúveis de um solo é a elevação do seu potencial osmótico, prejudicando as plantas em razão do decréscimo da disponibilidade de água daquele solo.

4.7 Índice de Qualidade das Águas – IQA

A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) adaptou o índice de qualidade de água da *National Sanitation Foundation* (NSF) aqui para o Brasil, este índice é a referência que vem sendo mais usada para caracterizar e avaliar a qualidade das águas superficiais no país.

O IQA incorpora nove variáveis consideradas relevantes para a avaliação da qualidade das águas, tendo como determinante principal a sua utilização para abastecimento público. As variáveis são: coliformes fecais, pH, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), nitrogênio total, fósforo total, temperatura, turbidez, resíduos totais e oxigênio dissolvido (CETESB, 2012).

O trabalho de coleta das águas superficiais (açude Banabuiú, rios Quixeramobim e Banabuiú) para o IQA ocorreu durante os meses de abril e outubro do ano de 2011, períodos chuvoso e de estiagem, para isto foram efetuadas 02 viagens de campo.

Os parâmetros temperatura, pH e oxigênio dissolvido foram realizados em campo através da sonda multiparâmetros (marca YSI 556 MPS); a amostragem e armazenamento para os parâmetros nitrogênio total, fósforo total, turbidez e resíduos totais foram realizados através dos frascos de polietileno de 500 mL e acondicionadas a 04 °C para preservação das amostras; a amostragem e armazenamento para o parâmetro DBO foram realizados através dos frascos de polietileno de 5.000 mL e acondicionadas a 04 °C para preservação das amostras; a amostragem e armazenamento para o parâmetro coliformes fecais foram realizados através dos frascos de polietileno de 100 mL e acondicionadas a 20 °C para preservação das amostras.

As 09 amostras por período de coleta (total de 18 amostras) foram submetidas a análises físicas, químicas e biológicas (total de 162 análises), sendo realizadas no Laboratório de Geoquímica do Departamento de Geologia da UFC. Os procedimentos dos métodos empregados nas análises estão descritos no *Standard Methods for the examination of water and wastewater* (APHA, 2001).

Oxigênio Dissolvido, pH e Temperatura

O equipamento utilizado foi uma sonda multiparâmetros de marca YSI 556 MPS.

Nitrogênio Total e Fósforo Total

As análises de nitrogênio total e fósforo total foram determinadas por oxidação alcalina com persulfato.

Turbidez

O equipamento utilizado foi um turbidímetro Analyser-ThermoOrion.

Resíduos Totais

Usou-se o método da secagem de sólidos totais (103 – 105 °C) para determinar os resíduos totais. Esta análise de resíduos totais foi realizada através da pesagem e evaporação da água em cápsulas de porcelana, em banho-maria.

Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO₅)

A demanda bioquímica de oxigênio foi determinada pelo método iodométrico. Medindo-se o oxigênio inicial e final (após 05 dias de incubação a 20 °C) de amostras diluídas (0, 25 e 50 %).

Coliformes Fecais

Os coliformes fecais foram determinados pelo método das membranas filtrantes, o qual consiste na filtração de água através de membrana filtrante feita de éster de celulose com 0,45 µm de porosidade e 47 mm de diâmetro. As bactérias ficaram retidas na superfície da membrana, após isto foram transferidas para um meio de cultura nutritivo, seletivo e diferencial; colocou-se a membrana sobre a superfície da placa e incubou-se (invertendo-a) a 36 °C por 24 horas, por fim fez-se a contagem de coliformes totais (ficaram verdes à azul) e a contagem dos coliformes fecais sob uma luz UV negra (brilho).

Entre as formulações existentes para uso e interpretação dos dados, talvez a mais simples e comum seja a média ponderada da qualidade individual de cada parâmetro associada ao peso relativo desse parâmetro, refletindo sua importância na variabilidade total. É desta forma que o IQA proposto pela NSF e CETESB é calculado. Logo, o IQA foi calculado pelo produtório ponderado das qualidades de água correspondentes às variáveis que integram o índice, de acordo com a Equação 11 a seguir descrita.

$$IQA = \prod_{i=1}^n q_i^{w_i} \quad (11)$$

Em que:

IQA: índice de qualidade de água, um número adimensional entre 0 e 100;

q_i : qualidade do i -ésimo parâmetro, um número entre 0 e 100, obtido da respectiva “curva média de variação de qualidade”, em função de sua concentração ou medida;

w_i : peso correspondente ao i -ésimo parâmetro, atribuído em função da sua importância para a explicação da variabilidade global da qualidade, isto é, um número entre 0 e 1, de forma que (Equação 12):

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (12)$$

sendo, n o número de parâmetros que entram no cálculo do IQA.

A partir do cálculo efetuado, pode-se determinar a qualidade das águas brutas, que é indicada pelo IQA, variando numa escala de 0 a 100, representado no Quadro 03.

Quadro 03 – Classificação do Índice de Qualidade de Água.

CATEGORIA	PONDERAÇÃO
Ótima	$80 \leq IQA \leq 100$
Boa	$52 \leq IQA < 79$
Regular	$37 \leq IQA < 51$
Ruim	$20 \leq IQA < 36$
Péssima	$IQA < 19$

Fonte: CETESB (2012).

4.8 Metais Pesados

O trabalho de amostragem nos mananciais superficiais e subterrâneos ocorreu nos meses de abril de 2011 e outubro de 2011, os quais representam períodos de chuva e de seca, respectivamente. Amostras de dezenove (19) pontos d'água (poços, açude e rio) foram coletadas em abril de 2011, repetindo-se os mesmos pontos em outubro de 2011 para a avaliação sazonal da qualidade da água (total de 38 amostras).

Após a coleta, as amostras foram acidificadas, com HNO_3^- , até $\text{pH} < 02$ e mantidas sob refrigeração até o momento da análise (total de 304 análises). A fração total dos metais pesados (Pb, Cd, Al, Mn, Ba, Cu, Ni e do ametal Se) foi determinada, no Laboratório de Geoquímica Ambiental do Departamento de Geologia da UFC, pelo método da espectrofotometria de absorção atômica com atomização eletrotérmica (EAA-AET), o qual

apresenta alta sensibilidade e baixo limite de detecção. Os componentes do sistema de EAA-AET são da marca Thermo Scientific S Series com forno de grafite (FG) integrado, de modelo GFS 97, software Solaar e trocador de calor (*Recirculating Chillers*).

As soluções padrão foram preparadas a partir de padrões comerciais, de marca Specsol, por meio de diluição em água purificada por osmose reversa, assim como as amostras e branco. O material utilizado foi descontaminado utilizando HNO₃ 1+1. No carrossel do sistema EAA-FG foram colocadas as amostras, branco e solução padrão, sendo preparadas automaticamente as soluções de calibração, diluição da amostra ou reconcentração. No teste de recuperação do analito para verificar a interferência da matriz salobra das amostras do aquífero cristalino, a recuperação foi satisfatória (entre 85 e 115 %) quando se trabalhou com amostras previamente diluídas 20 vezes.

4.9 Isótopos

Isótopos de um elemento são variedades deste elemento, que se caracterizam por números diferentes de nêutrons.

O ¹⁸O (oxigênio-18) e o D (deutério) são os isótopos estáveis mais pesados do oxigênio e do hidrogênio. São traçadores perfeitos, pois não “acompanham” a água, como acontece com um corante, mas são constituintes da própria água, tendo as mesmas propriedades químicas da água “comum”. A abundância relativa destes isótopos na água varia levemente em função de sua história no ciclo hidrológico (SANTIAGO *et al.* in FEITOSA *et al.* 2008, p. 256).

O oxigênio-18 é um isótopo estável do oxigênio, ou seja, não sofre decaimento radioativo; ocorre na natureza em abundância relativa (em relação ao oxigênio-16) em torno de 0,2 %.

As moléculas de água são formadas pela combinação dos isótopos de hidrogênio e do oxigênio.

Os isótopos aparecem nas seguintes proporções:

¹H : ²H (ou D) : ³H (ou T) = 99,984 : 0,016 : ≈ 10⁻¹⁶ (%) – em águas jovens

¹H : ²H (ou D) : ³H (ou T) = 99,984 : 0,016 (%) – em águas velhas

¹⁶O : ¹⁷O : ¹⁸O = 99,759 : 0,037 : 0,204 (%)

Desprezando os isótopos ¹⁷O e ³H e usando deutério (D) em lugar de ²H, a água é composta das seguintes moléculas: H₂¹⁶O, H₂¹⁸O, HD¹⁶O, D₂¹⁶O, HD¹⁸O e D₂¹⁸O.

As proporções médias (realizadas em água do mar) das principais moléculas são:

H₂¹⁶O (997.640 ppm) : HD¹⁶O (320 ppm) : H₂¹⁸O (2.040 ppm)

Porém, em águas de origens diversas (plantas, chuva, lagos etc.), estes valores variam (ferindo a regra das proporções constantes). Para as moléculas mais pesadas são:

HD¹⁶O (180 a 340 ppm)

H₂¹⁸O (1.900 a 2.040 ppm) (SANTIAGO *et al.*, *op. cit.*, p. 256).

A *Internacional Atomic Energy Agency* (IAEA), em cooperação com *World Meteorological Organization* (WMO), desde 1961, pesquisa os isótopos de hidrogênio e oxigênio nas precipitações de várias partes do mundo, providenciando dados básicos para aplicação hidrológica dos isótopos estáveis. Os primeiros dados da rede de observação da IAEA foram discutidos por Dansgaard (1964) *apud* IAEA (1981b). O grau de depleção ou enriquecimento dos isótopos pesados (^{18}O e D), em relação a uma água padrão, foi relacionado com parâmetros geográficos, tais como latitude, altitude, distância à costa, intensidade da precipitação e temperatura de um local. Os processos básicos que influenciam na composição isotópica das águas naturais no ciclo hidrológico são evaporação e condensação.

Segundo Custodio e Llamas (1983), a razão isotópica $R = ^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ (número de átomos de oxigênio-18/número de átomos de oxigênio-16) nas precipitações, decresce com a distância à costa, com o aumento da altitude, com a diminuição da temperatura e com a quantidade de chuva. Além disso, podem ser observadas variações sazonais, entre outras. A água superficial está submetida à evaporação e isto conduz a um “enriquecimento isotópico” da espécie pesada na água remanescente, ou seja, um aumento na razão $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$. O enriquecimento é máximo nos rios, lagos, reservatórios etc., submetidos a uma forte evaporação e com um grande tempo médio de residência da água (volume/vazão). A água dos rios sofre uma alteração na composição isotópica que depende do clima, da contribuição do escoamento superficial, da existência de lagoa e reservatórios no seu curso e também das interações com os aquíferos.

De acordo com Salati *et al.* (1971), quando o solo é muito permeável, as águas pluviais se infiltram rapidamente, recarregando os reservatórios subterrâneos, sem que a evaporação atue significadamente, e a pouca água que fica em superfície se evapora totalmente. Desta forma não ocorre modificação isotópica importante, e a água subterrânea apresenta composição isotópica correspondente à média ponderada das composições isotópicas das precipitações. No entanto, diversos fatores podem interferir na composição isotópica de águas subterrâneas, entre os quais:

- a) mistura com água de origem não meteórica;
- b) influência de águas fósseis, isto é, massas de água de origem meteórica, porém precipitadas em condições climáticas diferentes das atuais (paleoáguas);
- c) trocas isotópicas entre a água e minerais dos aquíferos (em águas termais).

As medidas de ^{18}O são feitas em relação a uma água padrão VSMOW (*Vienna Standard Mean Ocean Water*), que corresponde aproximadamente à água média dos oceanos, e usam como parâmetro de quantificação o valor de δ ‰, expresso pela Equação 13:

$$\delta(\text{‰}) = \left(\frac{Ra - Rp}{Rp} \right) \times 10^3 \quad (13)$$

Onde:

Ra – razão isotópica ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) entre o isótopo pesado, ^{18}O , e o mais abundante, ^{16}O , da amostra;

Rp – razão isotópica ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) no padrão.

O comportamento da razão D/H é semelhante à da razão $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, existindo, em escala mundial uma relação linear entre os ^{18}O e D em precipitações, expressa na GMWL – *Global Meteoric Water Line* (Equação 14) (Craig, 1961 *apud* IAEA, 1981b).

$$\delta\text{D} (\text{‰}) = 8 \delta^{18}\text{O} \text{‰} + 10 \text{‰} \quad (14)$$

Embora existam dados mais novos e mais precisos, como Rozanski (1993) que determinou uma reta meteórica mais precisa ($\delta\text{D}(\text{‰}) = 8,17 (\pm 0,07) \delta^{18}\text{O} \text{‰} + 11,27 (\pm 0,65) \text{‰}$), usa-se a GMWL como linha referencial.

De acordo com Santiago *et al. in* Feitosa *et al.* (2008), águas que sofreram pequeno grau de evaporação apresentam uma relação linear entre $\delta\text{D} (\text{‰})$ e $\delta^{18}\text{O} (\text{‰})$, mas em clima seco, onde ocorre evaporação durante a queda da chuva, resulta numa reta meteórica local com inclinação menor que 8. E segundo Santiago *et al.* (2007), nas regiões onde as águas subterrâneas possuem elevados teores em sais é possível identificar se a concentração destes decorre do processo de evaporação ou de processos internos do aquífero.

Como as águas se distinguem pelos isótopos, a água subterrânea, que não evaporou antes de sua infiltração no aquífero por meio da precipitação, guarda as características isotópicas da água da chuva. Já a água que infiltra no aquífero através de recursos hídricos superficiais fica marcada pelo efeito da evaporação, ou seja, valores de isótopos ambientais mais positivos. Portanto, com estes isótopos, na área aqui estudada, foi possível identificar interações águas superficiais/aquíferos.

O trabalho de coleta (águas de poços e águas superficiais) ocorreu durante 02 anos (julho de 2010 a abril de 2012). A amostragem foi realizada através de coletores plásticos (tipo *bailer*), armazenadas em garrafas de polietileno não estendidas, lacradas de uma forma efetiva para que não ocorresse evaporação e acondicionadas a 25 °C para preservação das amostras.

Trabalhou-se com 19 amostras (11 águas superficiais e 08 poços) por período de coleta (total de 152 amostras) e ainda com 16 amostras de água da chuva (monitoramento de 02 anos) para análises isotópicas de ^{18}O e D (total de 304 análises).

A água da chuva foi também armazenada em garrafas de polietileno não estendidas. Para se fazer a amostragem da água da chuva (mensalmente durante 02 anos, exceção dos meses sem chuva), foram necessárias 16 viagens de 01 dia à Banabuiú, por isto, foi necessário elaborar e construir um coletor (Figura 12), o qual constou de uma tela (para proteger a boca do funil de insetos e folhas ao redor), um funil (para a água da chuva ser coletada com maior facilidade), uma mangueira (por onde a água que entrou no funil passou até chegar na garrafa), um cano de policloreto de vinil – PVC (para deixar a mangueira esticada e deixar o funil numa altura de 1,80 m para a ação da gravidade atuar sobre a água e esta encher a garrafa), uma garrafa de polietileno de 05 litros (onde se coletou a água da chuva do mês), um isopor (para englobar e proteger a garrafa e a água da chuva da evaporação), papel alumínio (para refletir os raios solares e evitar ao máximo o aumento de temperatura no interior do isopor) e silicone (para evitar a evaporação da água da chuva).

Figura 12 – Coletor de água da chuva.



Fonte: O autor.

As análises foram realizadas no Laboratório de Ecologia Isotópica do Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA/USP), Piracicaba – SP, utilizando o método *Cavity Ring-Down Spectroscopy* (CRDS). Os valores de δ (‰) foram obtidos em relação ao padrão VSMOW (*Vienna Standard Mean Ocean Water*), fornecido pela IAEA/Vienna, com um erro de aproximadamente $\pm 0,2$ ‰ para δD e $\pm 0,07$ ‰ para $\delta^{18}\text{O}$.

4.10 Estratificação – Dinâmica das Águas Superficiais Armazenadas

O estudo das variações físico-químicas da água em função da profundidade do açude, o qual atinge profundidade de 57 m e é usado na irrigação de todo o trecho entre os municípios de Banabuiú e Limoeiro do Norte/Ceará, visa verificar a existência de estratificação, em que se deve a possibilidade da formação de estratos com qualidade de água distinta, de baixo teor em sais e salobras, as quais poderiam prejudicar as plantações.

Os processos físicos de estratificação e mistura vertical são de fundamental importância para a estrutura e a organização de processos químicos e biológicos em lagos, represas, rios e estuários. Nos ecossistemas aquáticos continentais, os processos, de estratificação e mistura, resultam dos efeitos acumulativos das trocas de calor e das entradas de energia; da radiação solar com a profundidade (a qual depende das condições óticas da água na superfície); da direção e força do vento; da direção e da energia cinética das entradas de água; e da direção e força das saídas de água (TUNDISI; TUNDISI, 2008, p. 74).

A mistura e a estratificação vertical são processos dinâmicos. As características morfométricas têm importância nas misturas vertical e horizontal: volume, profundidades máxima e média, e localização (latitude, longitude e altitude).

A camada de água superior, o epilímnio, mais aquecida e menos densa é também bastante homogênea pela ação do vento e pelo aquecimento térmico diurno e resfriamento térmico noturno, que formam termoclinas temporárias. A camada de água inferior, com temperatura mais baixa e mais densa, é denominada hipolímnio. O metalímnio é uma camada intermediária entre o hipolímnio e o epilímnio, que apresenta uma queda gradual de temperatura em relação ao epilímnio.

A estratificação e a desestratificação térmica são acompanhadas por uma série de outras alterações físicas e químicas na água. Destacam-se a distribuição vertical dos gases dissolvidos na água; a distribuição vertical de nutrientes, com acúmulo de substâncias e elementos químicos no hipolímnio durante a estratificação (TUNDISI; TUNDISI, *op. cit.*, p. 86).

Segundo Esteves (2011), quando a propagação do calor através da massa d'água se dá de maneira muito eficiente, a densidade da água é praticamente igual em todas as profundidades, não apresentando barreira física à circulação completa. Sob estas condições, diz-se que o reservatório encontra-se em instabilidade térmica. Por outro lado, quando as diferenças de temperatura geram camadas d'água com diferentes densidades que, por si já formam uma barreira física, impedem que se misturem, criando condições de estabilidade térmica. Quando este fenômeno ocorre, o reservatório encontra-se estratificado.

De acordo com Tundisi e Tundisi (2008), reservatórios em regiões tropicais apresentam diferenças térmicas mais acentuadas entre as camadas da superfície e as do fundo que podem chegar até 10 °C, mas em geral não excedem de 5 a 7 °C.

Esteves (2011) afirma que em reservatórios tropicais, a estratificação pode ocorrer durante a primavera, verão e outono, com desestratificação no inverno, ou são submetidos à estratificação e desestratificação diária. No semiárido, por exemplo, onde ocorrem misturas em menos de 24 horas, pode haver várias estratificações e misturas ao longo do dia. A atuação do vento na desestratificação é facilitada pela ausência de montanhas nas proximidades, ou quando o espelho d'água do reservatório possui grande área em relação à profundidade do corpo d'água.

Segundo Nogueira *in* Porto (1991), o aporte de nutriente e íons através dos tributários (rios e riachos), por escoamento superficial direto e pelas águas das chuvas, provoca mudanças na qualidade da água nos reservatório por colocar em movimento uma série de eventos que, em boa parte, dependem da estrutura térmica do reservatório (processo de estratificação ou mistura), tanto para determinação de sua intensidade como para a sua localização temporal e espacial. Em longo prazo, o inevitável acúmulo desses elementos influencia as características desses ambientes, tornando-os mais ou menos poluídos, dependendo da relação entre o aporte e as retiradas.

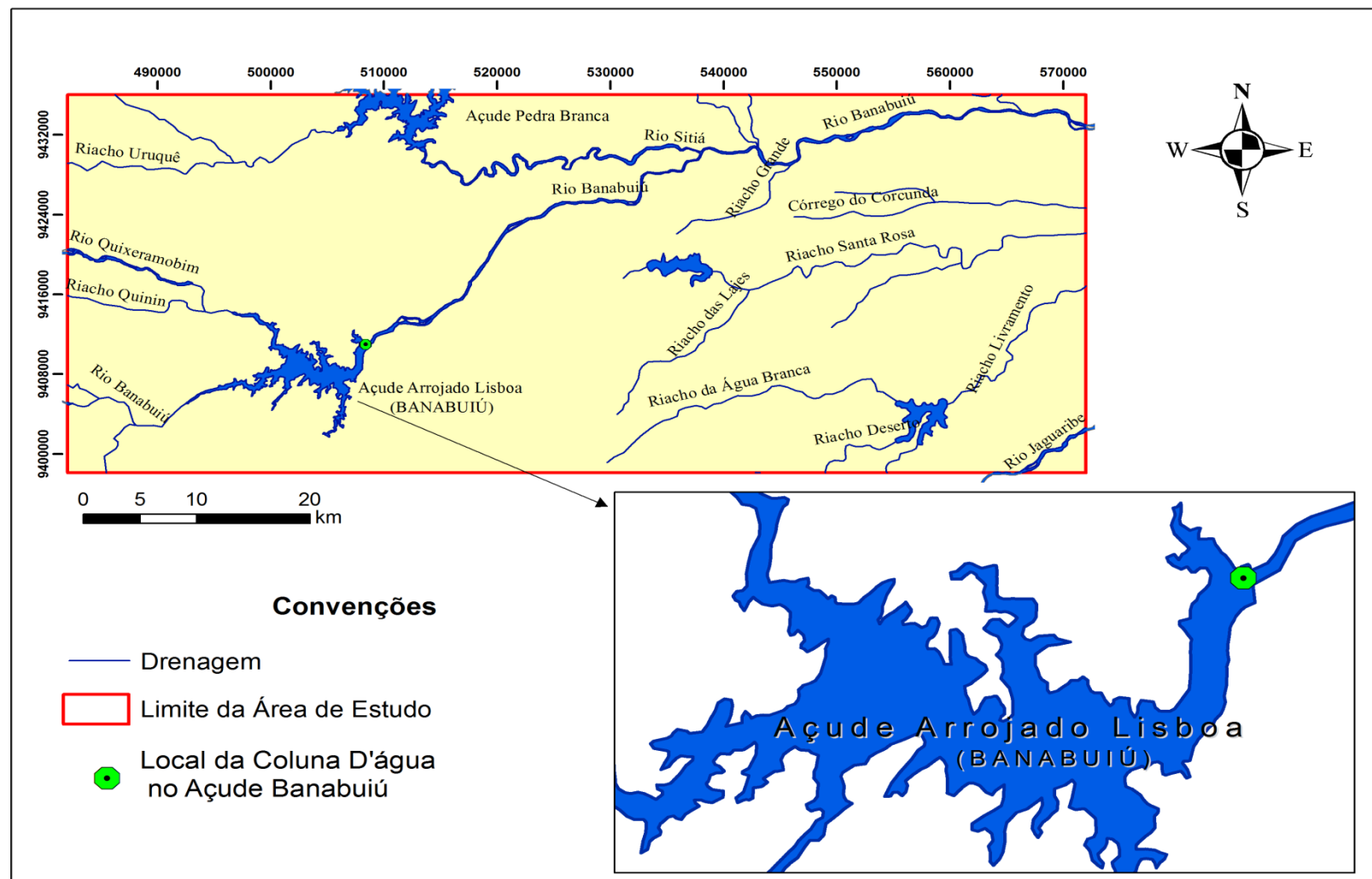
4.10.1 Análises físico-químicas da água do açude Banabuiú

Para o estudo de estratificação do açude Banabuiú, foram efetuados dois levantamentos da coluna d'água do reservatório, um no período chuvoso (maio de 2011) e outro no período de estiagem (novembro de 2011).

Para a realização destes levantamentos, foram realizadas medidas *in situ* de pH, CE, salinidade, oxigênio dissolvido e temperatura com uma sonda multiparâmetros (marca YSI 556 MPS) e coletas com uma garrafa de Vandorn Alfakit para análises físico-químicas, sendo que estas medidas e coletas ocorreram nas profundidades de 01, 20 e 40 metros, num período de 24 horas, com intervalo entre as amostragens de 04 horas, ou seja, 07 amostragens de superfície, meio e fundo, totalizando 21 amostragens por levantamento da coluna d'água do reservatório estudado, ou seja, total de 42 amostragens nos dois períodos estudados. As amostragens foram feitas na parte mais profunda do açude, onde se localiza a torre de controle (Figura 13). Esta torre se encontra nas coordenadas N508410 e E9410997. Foi utilizado um barco para se chegar ao local do ponto de coleta.

Após a coleta, as amostras foram armazenadas em garrafa de polietileno não estendidas (análises de ^{18}O e D), vidros âmbar (análise de nitrogênio amoniacal) e frascos de polietileno (análises físico-químicas), depois foram acondicionadas nas temperaturas certas para a preservação das amostras, por fim, foram realizadas as análises físico-químicas e de ^{18}O e D (total de 714 análises) citadas nos tópicos anteriores.

Figura 13 – Mapa de localização da torre no açude Banabuiú (Arrojado Lisboa) – Ceará.



Fonte: Base Cartográfica do Serviço Geológico do Brasil – CPRM (2003).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Superfície Potenciométrica

Dos 10 poços trabalhados neste estudo, 02 encontravam-se sempre fechados, e 08 poços foram submetidos a oito medições de nível em 02 anos (Tabela 11), sendo 04 no período chuvoso e as outras 04 no período de estiagem, de julho de 2010 até abril de 2012, com uma periodicidade de 03 meses, tendo em vista a obtenção de possíveis variações das equipotenciais e eventuais inversões locais do fluxo subterrâneo.

Tabela 11 – Níveis estáticos em metros, em dois ciclos hidrológicos (julho/2010 até abril/2012).

Poços	N.E. JUL. 2010	N.E. OUT. 2010	N.E. JAN. 2011	N.E. ABR. 2011	N.E. JUL. 2011	N.E. OUT. 2011	N.E. JAN. 2012	N.E. ABR. 2012	MÉDIA N.E. CHUVA	MÉDIA N.E. SECO	N.E. MÁX.	N.E. MÍN.
PA01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PA02	0,68	0,80	S.M.	S.M.	S.M.	1,32	4,20	S.M.	4,20	0,93	4,20	0,68
PA03	S.M.	0,00	0,00	S.M.	0,00	0,00	0,00	S.M.	0,00	0,00	0,00	0,00
PA04	S.M.	S.M.	0,40	S.M.	6,50	6,50	6,50	6,50	4,47	6,50	6,50	0,40
PC01	1,00	S.M.	1,30	S.M.	1,10	2,60	2,20	1,85	1,78	1,57	2,60	1,00
PC02	S.M.	4,40	4,90	S.M.	4,50	5,10	S.M.	6,60	5,75	4,67	6,60	4,40
PC03	S.M.	3,75	S.M.	3,70	1,90	2,20	S.M.	3,70	3,70	2,62	3,75	1,90
PC04	S.M.	3,20	3,65	2,40	S.M.	2,85	2,85	S.M.	2,97	3,03	3,65	2,40

Fonte: O autor.

N.E.: Nível Estático.

MÁX.: Máximo.

MÍN.: Mínimo.

S.M.: Sem Medição.

Os dados mostram que o nível estático das águas dos aluviões dos rios Quixeramobim e Banabuiú varia de aflorante a 7,30 m (Tabela 12), com média de 2,5 m, portanto a água pode ser facilmente captada, como acontece através da escavação de cacimbas.

As linhas isotopociais foram traçadas em intervalo pré-fixado, por interpolação, a partir dos valores de potencial hidráulico medidos nos pontos de observação, ou seja, poços nos aluviões, rios Quixeramobim e Banabuiú, e dados da geofísica realizada nos aluviões da área de estudo (Tabela 12).

Tabela 12 – Cota altimétrica, nível estático médio e carga hidráulica dos pontos de observação.

Pontos de Observação	N	E	Cota (m)	Média NE Chuva (m)	Média NE Seco (m)	Carga Hidráulica Chuva (m)	Carga Hidráulica Estiagem (m)
PA01	482374	9415410	179,00	0,00	0,00	179,00	179,00
PA02	485156	9398730	155,00	4,20	0,93	150,80	154,07
PA03	510522	9412926	105,00	0,00	0,00	103,60	103,60
PA04	570137	9434045	46,37	4,47	6,50	41,90	39,87
RB01	484550	9405628	150,00	0,00	0,00	150,00	150,00
RB02	499863	9406678	140,00	0,00	0,00	140,00	140,00
RB03	508952	9411244	100,00	0,00	0,00	100,00	100,00
RB04	515015	9414478	80,00	0,00	0,00	80,00	80,00
RB05	544583	9428902	60,00	0,00	0,00	60,00	60,00
RB06	570666	9433742	43,71	0,00	0,00	43,71	43,71
RQ01	487637	9418786	152,00	0,00	0,00	152,00	152,00
RQ02	495669	9414834	150,00	0,00	0,00	150,00	150,00
SEV 01	482969	9404722	152,00	1,30	SD	150,70	SD
SEV 02	494012	9414778	145,00	1,20	SD	143,80	SD
SEV 03	509003	9411339	98,00	3,00	SD	95,00	SD
SEV 04	514948	9414676	86,00	3,40	SD	82,60	SD
SEV 05	519310	9420375	83,00	2,50	SD	80,50	SD
SEV 06	524434	9424539	78,00	3,50	SD	74,50	SD
SEV 07	532895	9427389	69,00	2,20	SD	66,80	SD
SEV 08	538621	9430030	68,00	0,90	SD	67,10	SD
SEV 09	544647	9428989	60,00	1,30	SD	58,70	SD
SEV 10	552767	9431907	59,00	1,50	SD	57,50	SD
SEV 11	560190	9433566	52,00	7,30	SD	44,70	SD
SEV 12	569033	9434203	45,00	3,50	SD	41,50	SD

Fonte: O autor.

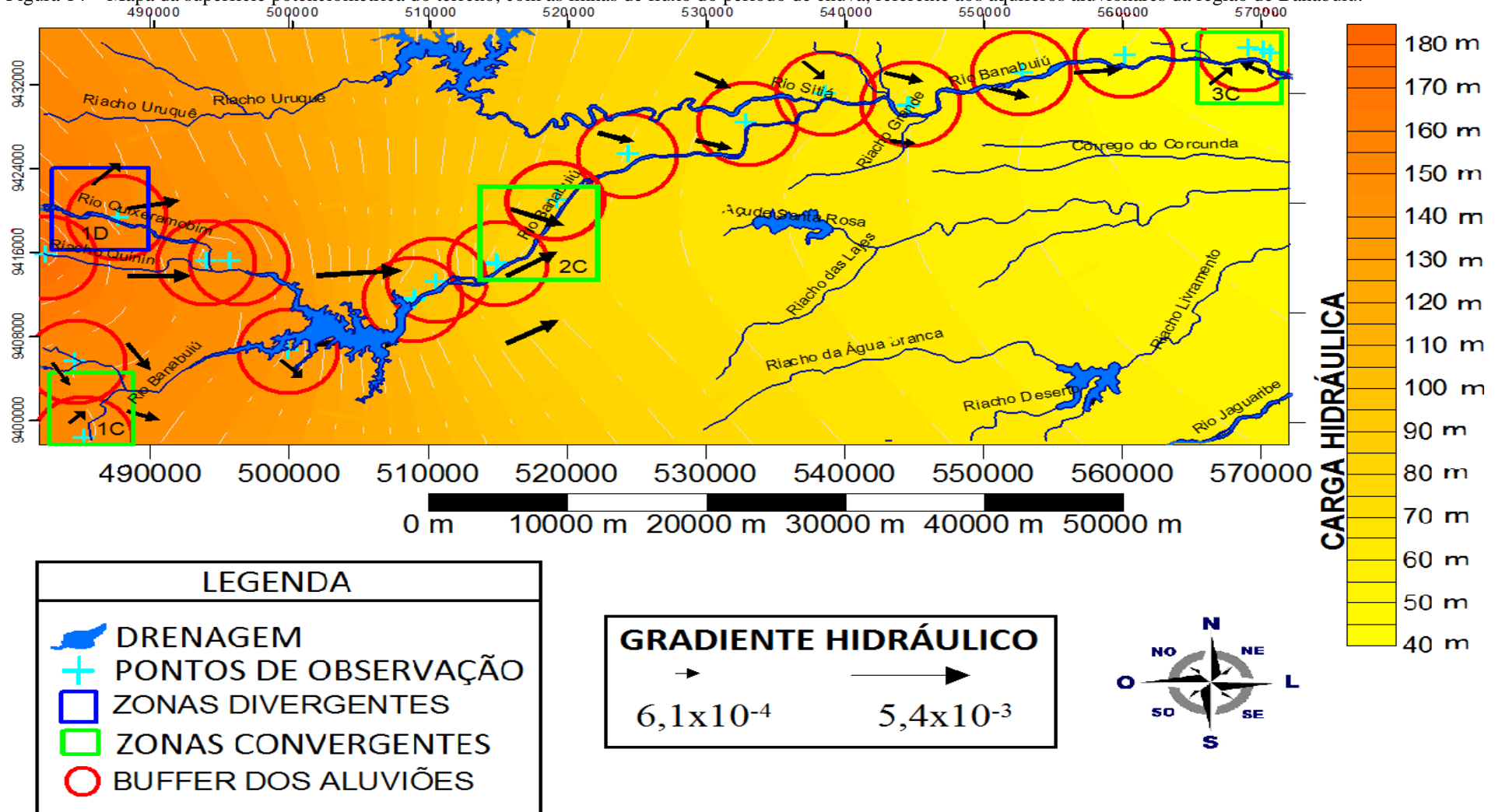
SEV: Sondagem Elétrica Vertical.

SD: Sem Dados.

A carga hidráulica variou de 39,87 a 179,00 metros. O gradiente hidráulico no período de chuva variou de $6,1 \times 10^{-4}$ a $5,4 \times 10^{-3}$ e no período de estiagem variou de $1,7 \times 10^{-4}$ e $5,0 \times 10^{-3}$.

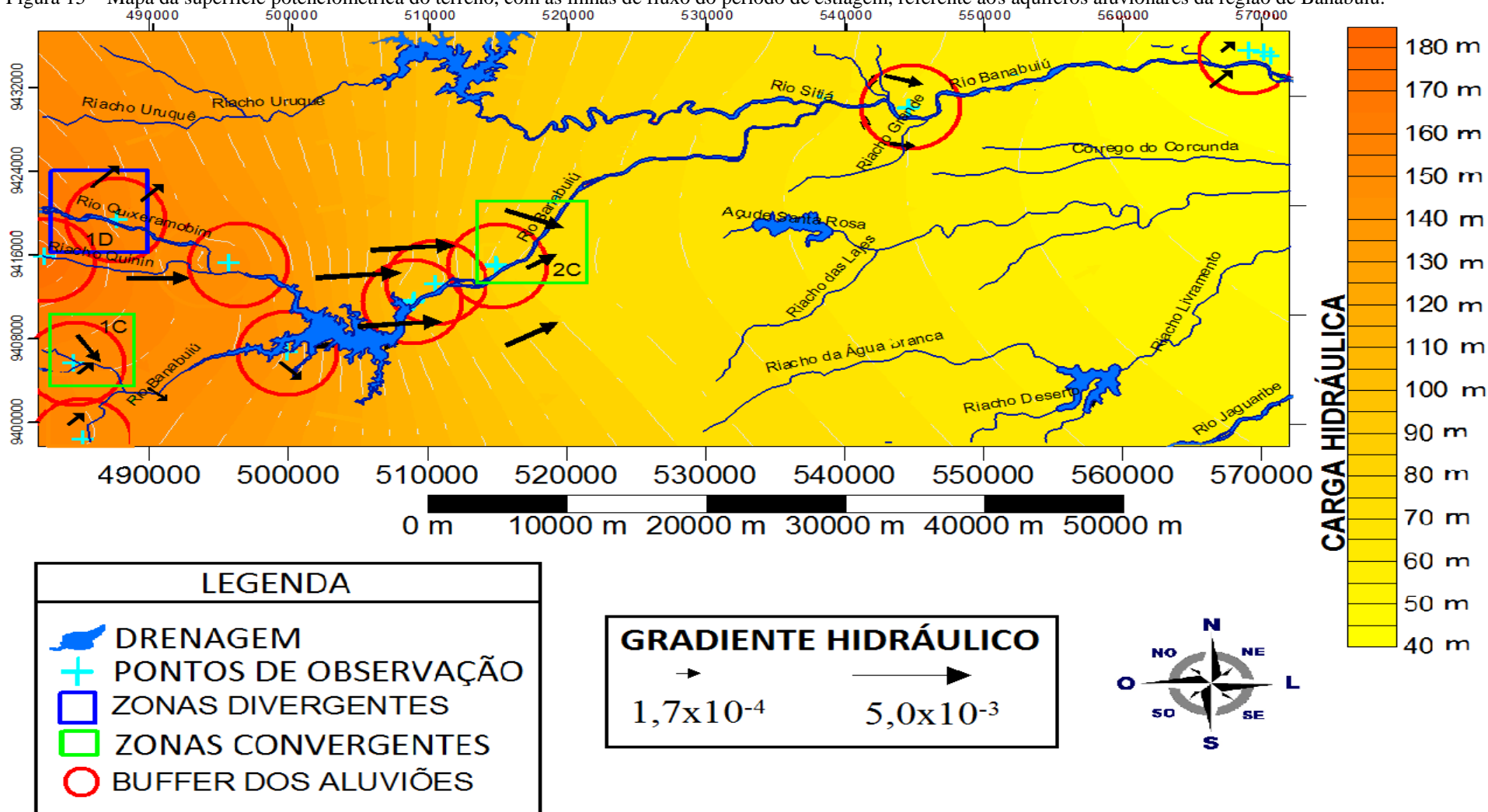
Foram obtidos os mapas da superfície potenciométrica, no qual, as setas (vetores) nos *buffers* (em vermelho) indicam as linhas de fluxo da água subterrânea nos aluviões; ainda foram separados, em azul, os divisores do fluxo subterrâneo e, em verde, as zonas de convergência de fluxo (Figuras 14 e 15). Ressalta-se que o programa Surfer 8.0 gerou os vetores apenas para os *buffers* (zona dos aluviões), no entanto, para uma melhor visualização da direção (vetores) do fluxo devido os aluviões da área estudada serem estreitos, optou-se por aumentar o raio dos *buffers* apenas para efeitos visuais.

Figura 14 – Mapa da superfície potenciométrica do terreno, com as linhas de fluxo do período de chuva, referente aos aquíferos aluvionares da região de Banabuiú.



Fonte: O autor.

Figura 15 – Mapa da superfície potenciométrica do terreno, com as linhas de fluxo do período de estiagem, referente aos aquíferos aluvionares da região de Banabuiú.



Fonte: O autor.

Nos períodos de chuva e estiagem, a superfície freática acompanha o relevo. Nos períodos de chuva e de estiagem, o fluxo subterrâneo dirige-se para Nordeste e para Leste, seguindo o rio Banabuiú em direção ao rio Jaguaribe. Nestes dois períodos, a zona de divergência 1D apresentou-se como zona potencial de recarga (fontes de alimentação) ou como zonas menos explotadas. Esta zona 1D à Oeste da área, está localizada em uma área topograficamente mais elevada, com o fluxo em direção ao Leste e ao Nordeste. Esta zona potencial tem um rumo preferencial do fluxo na direção dos rios Quixeramobim e Banabuiú. Se pode deduzir como zona de alimentação do aquífero aluvionar do rio Quixeramobim a zona 1D, mediante a infiltração das precipitações. Este mapa potenciométrico nos mostra que o domínio Oeste representa a principal área potencial de recarga (fonte de alimentação) do aquífero aluvionar do rio Quixeramobim, já o rio Banabuiú não apresentou uma zona potencial de recarga.

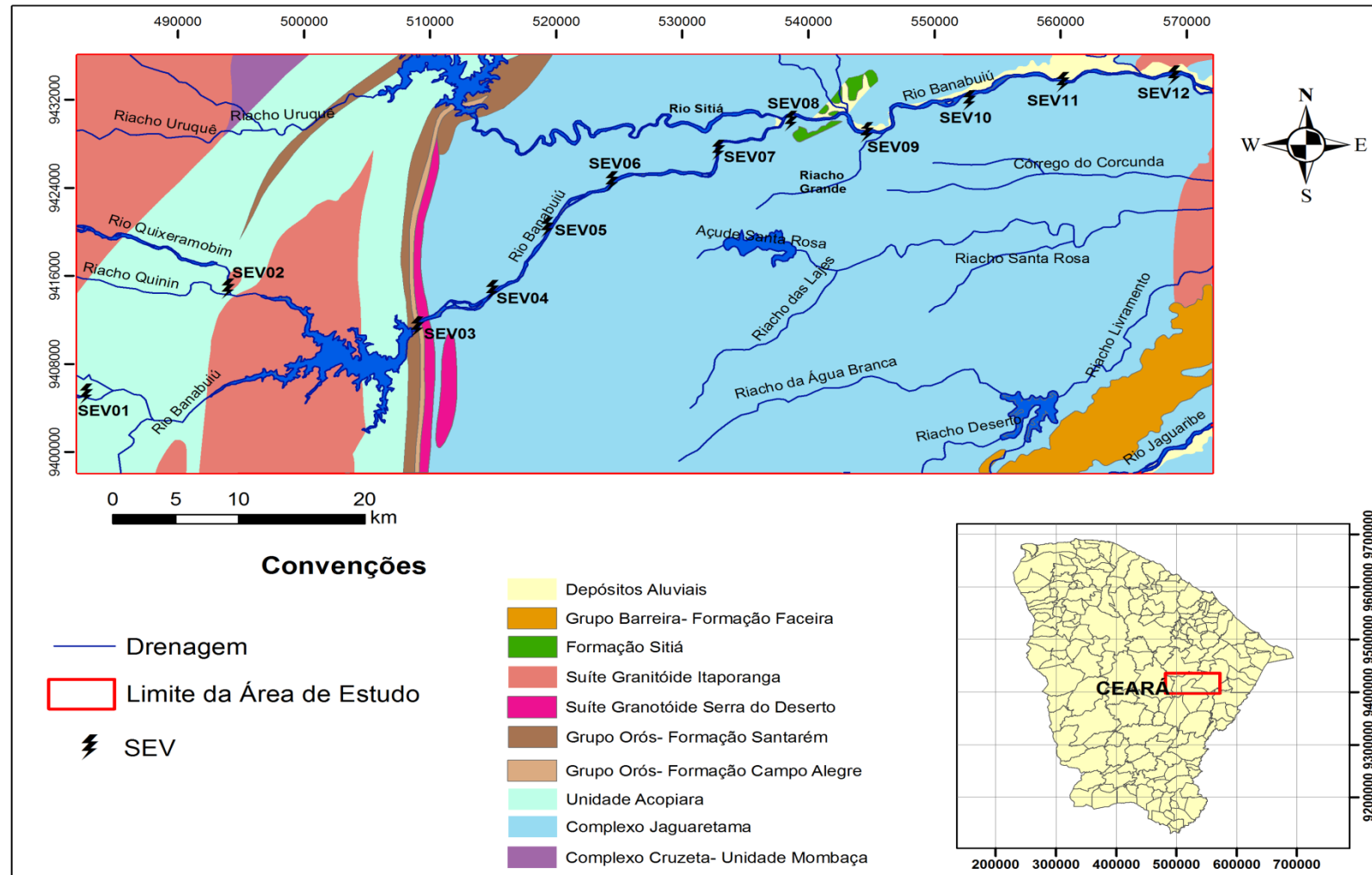
Notou-se que tanto no período de chuva como de estiagem, a direção do fluxo subterrâneo tende a seguir para um único ponto, as zonas de convergência 01C, 02C (para ambos os períodos) e 03C (para período de chuva), se apresentam como zonas potenciais de retiradas da água subterrânea. Cresce a convergência das setas de direção do fluxo destas zonas no período de estiagem, principalmente na zona 1C, pois é o período no qual há uma maior necessidade de exploração de água subterrânea na região estudada devido à escassez de água. Percebe-se ainda que estas zonas de convergência estão localizadas, logicamente, próximas aos poços (PA02, PA03 e PA04), no entanto, para o ponto PA01 não apareceu nenhuma zona de convergência, isto se deve ao fato de que este ponto de amostragem é uma cacimba com nível aflorante durante todo o ano.

Moura (2008), em seu estudo no Perímetro Irrigado de Morada Nova (PIMN) (área adjacente a leste), mostrou que existem várias zonas de exploração de água subterrânea no aluvião do rio Banabuiú, trecho entre Morada Nova e Limoeiro do Norte, pois nesta área a quantidade de poços é muito maior (mais de 500 poços neste trecho), já aqui neste cenário, com pouquíssimos poços no aluvião, nota-se que as zonas de exploração são relativamente fracas, quando comparadas ao PIMN. Isto ocorre porque a área aqui estudada tem o açude para provimento de água sem necessidade de bombeamentos excessivos.

5.2 Interpretação Geofísica

Para gerar o modelo geoeétrico final, 12 sondagens elétricas verticais (SEVs) com o método Schlumberger foram executadas na área estudada (Tabela 12 e Figura 16), com o espaçamento de eletrodos de corrente ($AB/2$), variando de 50 a 100 metros. As sondagens foram distribuídas em uma malha irregular, abrangendo os vários ambientes geológicos. Um transmissor de corrente e um receptor de potencial elétrico (Geotest 1000A) foram utilizados na aquisição dos dados.

Figura 16 – Mapa geológico da área com a localização dos pontos de levantamento geolétrico (SEVs).



Fonte: Base Cartográfica do Serviço Geológico do Brasil – CPRM (2003).

Com base na eletrorresistividade (Anexo A), foram identificados 03 estratos geoeletricos predominantes, que foram descritos de cima para baixo como: Camada 01 (solos insaturados; solos e sedimentos inconsolidados secos; areias grossas até cascalhos; superfície de recarga); Camada 02 (sedimentos inconsolidados saturados, compreendendo predominantemente níveis arenosos; aquífero superior livre; aquífero aluvionar); Camada 03 (manto de alteração; rochas cristalinas do pré-cambriano; embasamento impermeável).

Os sedimentos superficiais insaturados (Tabela 13) apresentam uma espessura média de 2,63 m, sendo a espessura mínima de 0,90 m e a máxima de 7,30 m, sendo a resistividade média de 546,50 ohm.m. O aquífero aluvionar apresenta uma espessura média da ordem de 7,08 m, com mínimo de 3,30 m e máximo de 16,30 m, sendo a resistividade média de 89,12 ohm.m.

Para que se tivesse uma ideia melhor das profundidades, resistividades, espessuras e geologia local, foi feito uma análise qualitativa dos dados das SEVs, onde chegou-se ao erro médio de 2,66 %, sendo os resultados dos perfis litológicos os mais próximos da realidade.

Tabela 13 – Profundidades e resistividades médias das SEVs. Continua.

SONDAGENS		PROF. (m)/ ESP. (m)	RES. MÉDIA (ohm.m)
SEV 01			
CAMADA 01	(INSATURADO)	0-1,3	818,7
CAMADA 02	(SATURADO)	1,3-7,0/ 5,7	80,2
CAMADA 03	(CRISTALINO)	> 7,0	> 822,3
SEV 02			
CAMADA 01	(INSATURADO)	0-1,2	31,9
CAMADA 02	(SATURADO)	1,2-4,5/ 3,3	11,0
CAMADA 03	(CRISTALINO)	> 4,5	> 1044,6
SEV 03			
CAMADA 01	(INSATURADO)	0-3,0	831,8
CAMADA 02	(SATURADO)	3,0-8,5/ 5,5	107,6
CAMADA 03	(CRISTALINO)	> 8,5	> 4059,3
SEV 04			
CAMADA 01	(INSATURADO)	0-3,4	1013,8
CAMADA 02	(SATURADO)	3,4-7,9/ 4,5	135,8
CAMADA 03	(CRISTALINO)	> 7,9	> 4049,8
SEV 05			
CAMADA 01	(INSATURADO)	0-2,5	102,8
CAMADA 02	(SATURADO)	2,5-9,3/ 6,8	372,6
CAMADA 03	(CRISTALINO)	> 9,3	> 673,3

Tabela 13 – Profundidades e resistividades médias das SEVs. Conclusão.

SONDAGENS		PROFUNDIDADE (m)	RES. MÉDIA (ohm.m)
SEV 06			
CAMADA 01	(INSATURADO)	0-3,5	909,9
CAMADA 02	(SATURADO)	3,5-11,4/ 7,9	108,1
CAMADA 03	(CRISTALINO)	> 11,4	> 1004,5
SEV 07			
CAMADA 01	(INSATURADO)	0-2,2	83,1
CAMADA 02	(SATURADO)	2,2-9,0/ 6,8	71,5
CAMADA 03	(CRISTALINO)	> 9,0	> 659,2
SEV 08			
CAMADA 01	(INSATURADO)	0-0,9	79,6
CAMADA 02	(SATURADO)	0,9-7,2/ 6,3	72,9
CAMADA 03	(CRISTALINO)	> 7,2	> 468,7
SEV 09			
CAMADA 01	(INSATURADO)	0-1,3	112,7
CAMADA 02	(SATURADO)	1,3-5,5/ 4,2	57,4
CAMADA 03	(CRISTALINO)	> 5,5	> 740,4
SEV 10			
CAMADA 01	(INSATURADO)	0-1,5	1243,6
CAMADA 02	(SATURADO)	1,5-6,8/ 5,3	21,0
CAMADA 03	(CRISTALINO)	> 6,8	> 409,7
SEV 11			
CAMADA 01	(INSATURADO)	0-7,3	539,2
CAMADA 02	(SATURADO)	7,3-23,6/ 16,3	11,0
CAMADA 03	(CRISTALINO)	> 23,6	> 154,0
SEV 12			
CAMADA 01	(INSATURADO)	0-3,5	153,3
CAMADA 02	(SATURADO)	3,5-15,9/ 12,4	20,3
CAMADA 03	(CRISTALINO)	> 15,9	> 79,2

Fonte: O autor.

PROF.: Profundidade.

ESP.: Espessura.

Os valores de resistividade sugerem um padrão para as camadas onde o cristalino apresentou as maiores resistividades, chegando a mais de 4.059,3 ohm.m, e a camada saturada apresentou valores entre 11,0 e 372,6 ohm.m. Para o cristalino as resistividades mínimas variaram desde 79,2 até 4.059 ohm.m.

Com o resultado das SEVs 11 e 12 percebeu-se que a região Leste da área de estudo (Morada Nova) possui uma espessura maior na camada saturada, ou seja, aumentando assim a quantidade de água armazenada no aquífero (reserva permanente). Moura (2008) em seu estudo no PIMN encontrou uma média de espessura no pacote saturado (aquífero

aluvionar) de 36,75 metros e observou também que esta espessura aumenta em direção ao rio Jaguaribe, portanto, este aumento da espessura dos aquíferos aluvionares se dá desde Banabuiú até Limoeiro do Norte. Esta grande espessura saturada da região a leste da área (mais abundante em água subterrânea) comprova a diferença de riqueza de água subterrânea entre estas áreas adjacentes.

5.3 Balanço Hídrico

5.3.1 Avaliação da Reserva Reguladora pelo Método do Balanço Hídrico

Os métodos de estimativa de recarga que utilizam dados de monitoramento prontamente disponíveis, tais como precipitação e temperatura, têm uso preferencial em relação àqueles que exigem observações mais especializadas.

Método do Balanço Hídrico

A evapotranspiração real (ETR) foi determinada para cada mês da seguinte forma:

$$ETR = PPT, \text{ se } PPT - ETP < 0$$

$$ETR = ETP, \text{ se } PPT - ETP > 0$$

Portanto, I_e (Infiltração eficaz) é a diferença entre PPT (precipitação) e a ETR (evapotranspiração real) depois de esgotada a capacidade de retenção de água no solo ($C = 100 \text{ mm}$).

Podem existir várias fontes de recarga para o sistema subterrâneo e cada fonte deve ser considerada separadamente na estimativa de recarga.

A infiltração eficaz (I_e) calculada na Tabela 14 é a forma mais acessível para uma primeira estimativa de recarga. É obtida quando se retira da infiltração total a parcela que fica retida na zona não saturada, durante o processo de infiltração. Esta parcela, que é a capacidade de saturação do solo (C), é uma constante que depende das características do meio não saturado, especialmente das características granulométricas, e do tipo de cobertura vegetal.

Tabela 14 – Cálculo do balanço hídrico realizado para a região estudada (com dados meteorológicos de 1988 a 2012).

Mês	T média (°C)	Im (mm)	K	ETP (mm)	PPT (mm)	PPT-ETP (mm)	C (mm)	ETR (mm)	Ie (mm)
JAN	26,7	12,3	1,08	147,7	92,0	-55,7	0,0	92,0	0,0
FEV	27,1	12,6	0,97	140,3	97,1	-43,2	0,0	97,1	0,0
MAR	26,5	12,2	1,05	139,6	142,3	2,7	2,7	139,6	0,0
ABR	25,9	11,8	0,99	120,8	157,1	36,3	39,0	120,8	0,0
MAI	26,2	12,0	1,01	128,7	94,6	-34,0	5,0	94,6	0,0
JUN	26,1	11,9	0,96	120,6	47,7	-72,9	0,0	47,7	0,0
JUL	26,4	12,1	1,00	131,1	22,7	-108,4	0,0	22,7	0,0
AGO	27,1	12,6	1,01	146,1	9,3	-136,8	0,0	9,3	0,0
SET	28,0	13,3	1,00	163,5	0,2	-163,3	0,0	0,2	0,0
OUT	28,2	13,4	1,06	178,1	1,0	-177,1	0,0	1,0	0,0
NOV	28,1	13,3	1,05	174,0	1,3	-172,8	0,0	1,3	0,0
DEZ	28,0	13,3	1,10	179,9	20,2	-159,7	0,0	20,2	0,0
Ianual =		150,8		Totais anuais	685,5			646,5	0,0

Fonte: O autor.

T média: Temperatura Média.

Im: Índice Térmico Mensal.

Ianual: Índice Térmico Anual.

Ie: Infiltração Eficaz.

PPT: Precipitação Pluviométrica.

ETR: Evapotranspiração Real.

ETP: Evapotranspiração Potencial.

K: Fator de Correção.

C: Água Retida no Solo.

Como mostra a tabela acima, a infiltração eficaz por ano foi de 0,0 (zero) milímetro por metro quadrado, para os aluviões dos rios Banabuiú e Quixeramobim, ou seja, não houve infiltração, isto de acordo com o método do balanço hídrico, no qual se usou a média histórica (período de 1988 a 2012) da precipitação e uma média de 04 anos para a temperatura (2009 a 2012), o que não quer dizer que nunca houve recarga dos aluviões, pois existem anos que se sobressaem às médias, gerando assim uma reserva renovável, como por exemplo o ano de 2009 (Tabela 15), que teve sua precipitação anual de 1.158,6 mm.

Tabela 15 – Cálculo do balanço hídrico realizado para a região estudada no ano de 2009.

Mês	T média (°C)	Im (mm)	K	ETP (mm)	PPT (mm)	PPT-ETP (mm)	C (mm)	ETR (mm)	Ie (mm)
JAN	26,7	12,3	1,08	149,6	15,5	-134,1	0,0	15,5	0,0
FEV	27,1	12,6	0,97	140,6	80,2	-60,4	0,0	80,2	0,0
MAR	24,5	10,8	1,05	108,0	232,1	124,1	100,0	108	124,1
ABR	24,0	10,5	0,99	94,7	339,7	245,0	100,0	94,7	245,0
MAI	24,4	10,8	1,01	102,3	283,3	181,0	100,0	102,3	181,0
JUN	24,0	10,5	0,96	92,4	49,8	-42,6	0,0	49,8	0,0
JUL	24,2	10,7	1,00	99,2	53	-46,2	0,0	53	0,0
AGO	25,4	11,5	1,01	118,5	92,2	-26,3	0,0	92,2	0,0
SET	26,9	12,5	1,00	142,7	0	-142,7	0,0	0	0,0
OUT	27,7	13,0	1,06	166,4	0	-166,4	0,0	0	0,0
NOV	28,1	13,3	1,05	172,5	0	-172,5	0,0	0	0,0
DEZ	27,8	13,1	1,10	175,1	12,8	-162,3	0,0	12,8	0,0
Ianual =		141,7		Totais anuais	1.158,6			608,5	250,1

Fonte: O autor.

T média: Temperatura Média.

Im: Índice Térmico Mensal.

Ianual: Índice Térmico Anual.

Ie: Infiltração Eficaz.

PPT: Precipitação Pluviométrica.

ETR: Evapotranspiração Real.

ETP: Evapotranspiração Potencial.

K: Fator de Correção.

C: Água Retida no Solo.

Ainda foi calculado a infiltração eficaz dos 04 anos (2009-2012) individualmente, e como o esperado, apenas o ano de 2009 apresentou infiltração eficaz, esta foi de 250,1 mm (no ano de 2009) em 01 m², isto representa que no ano de 2009 a recarga na área de 27,6 km² dos aluviões dos rios Quixeramobim e Banabuiú foi de 6,9x10⁶ m³/ano (ou 18,9x10⁶ L/d), este valor corresponde a cerca de 21,6 % do volume de chuva que caiu sobre a área estudada no ano de 2009.

Moura (2008), considerando uma média de 02 anos, estimou em 3,06x10⁶ m³/ano a infiltração eficaz para o PIMN através do método do balanço hídrico. Já Vasconcelos (2009) *in* COGERH (2009), considerando médias históricas, mostrou que Quixeré e Limoeiro do Norte (Ceará) não forneceram excedente de água, impedindo que se fizesse estimativa da recarga potencial. Na área de Banabuiú, aqui estudada, a situação é a mesma para o cálculo de reserva através do balanço hídrico considerando-se a média histórica.

Partindo da hipótese de que o sistema aquífero é homogêneo no que se refere à porosidade efetiva e condutividade hidráulica, sabe-se que a recarga assimilada por este sistema é variável em função da posição, tendo em vista que a transmissividade e a carga hidráulica assumem valores diferenciados para diferentes locais. Desta forma, a estimativa de recarga exige a consideração de hipóteses simplificadoras tornando qualquer avaliação quantitativa vulnerável a questionamentos (VASCONCELOS, 2009, p. 81).

5.4 Avaliação das Reservas Reguladora e Permanente

Segundo Gomes (2005), a avaliação quantitativa bem como a qualitativa das reservas de água dos aquíferos aluvionares se reveste de extrema importância por nortear seu aproveitamento. O aspecto quantitativo das águas armazenadas nos aquíferos aluvionares é analisado a seguir, calculando-se as reservas permanentes e reguladoras.

Os dados dimensionais que determinam as reservas de águas subterrâneas podem ser fixos, por substrato e camada confinante de aquíferos confinados, ou variáveis, definidos pelo substrato e a superfície potenciométrica dos aquíferos livres. Portanto, o volume armazenado na camada aquífera dos aluviões da região estudada é delimitado na base pelo substrato impermeável, influência constante, e no topo pela superfície potenciométrica, afetada por flutuações periódicas. Assim, o cálculo das reservas dos aquíferos livres se baseia essencialmente no estudo das flutuações médias da superfície potenciométrica no ciclo hidrológico. O período aqui considerado para avaliação da reserva renovável corresponde a 12 meses (2011).

5.4.1 Reserva Reguladora

No transcurso de um ciclo hidrológico determinado, a superfície potenciométrica oscila entre um nível mínimo e um nível máximo para retornar depois ao nível mínimo. Este último raramente se encontra à mesma profundidade que o nível inicial, devido às variações meteorológicas e de exploração. Estas posições extremas limitam uma camada do aquífero cujo volume de água correspondente representa as reservas reguladoras, os recursos exploráveis, ou seja, o volume máximo que o aquífero poderá fornecer sem depleção (GOMES, *op. cit.*, p. 198.).

Considerando-se o método do balanço hídrico, a reserva renovável para o ano de 2009 (reserva reguladora ou recarga anual ou infiltração eficaz) foi de $6,9 \times 10^6$ m³/ano para os aquíferos aluvionares. Este valor corresponde a 21,6 % do volume de chuva que caiu sobre a área estudada no ano de 2009. No entanto, ressalta-se que o método proposto do balanço hídrico adota médias históricas, e com estas médias históricas encontrou-se zero milímetro de infiltração eficaz.

Banabuiú tinha em 2010 uma população rural de 8.562 pessoas (IPECE, 2011, p. 7), então, calculando para o ano de 2009, ter-se-ia uma demanda de $2,2 \times 10^3$ L/d por pessoa, no entanto, se sabe que a realidade do local é outra, pois o cálculo anterior se deu apenas para um ano (2009), enquanto que os outros anos (2010-2012) aqui estudados não tiveram infiltração. Logo, pegou-se o resultado do ano de 2009 e fez-se uma média para os 04 anos estudados, o qual gerou uma demanda de 552 L/d por pessoa; enquanto que no PIMN, Moura (2008) encontrou o valor de 167,6 L/d por pessoa para uma área de 83,6 km². Ressalta-se que se utilizou no cálculo apenas a reserva renovável. A ONU estabelece cerca de 110 L/d por pessoa para atender as necessidades de consumo e higiene (REDE DE TECNOLOGIA SOCIAL, 2008), ou seja, baseado na recarga de 2009, hipoteticamente tem-se para a região estudada uma quantidade suficiente de água para consumo e higiene da população local.

Deve-se levar em consideração a quantidade mínima de poços existente na região estudada, pois em consideração a área circunvizinha (PIMN), que possui mais de 500 poços cadastrados, esta área aqui abordada possui uma quantidade mínima (assunto abordado no Capítulo 04 “Cadastro dos Pontos de Amostragem”), isto é evidente que minimiza a exploração do recurso hídrico subterrâneo. Portanto, ressalta-se mais ainda a importância de um ótimo gerenciamento destes recursos pelos órgãos públicos, para que em momentos temporais de estiagem (como o período estudado), não haja tanto sofrimento para as pessoas que moram em ambientes escassos de água, como as regiões no semiárido nordestino.

5.4.2 Reserva Permanente

As reservas permanentes representam o volume de água armazenada na camada aquífera limitada na base pelo substrato impermeável e no topo pela superfície potenciométrica mínima (GOMES, 2005, p. 199).

A reserva permanente do aquífero foi calculada usando-se a Equação 25:

$$R_p = A \times b \times S_y \quad (25)$$

onde, adotou-se a porosidade eficaz (S_y) média de 17,8 %, baseada na equação de Biecinski, a espessura saturada (b) média de aproximadamente 7,08 m, baseada nas SEVs e uma área de 27,6 km² (área dos aluviões). A partir destes dados obteve-se a reserva permanente (R_p) de aproximadamente **$34,8 \times 10^6$ m³**. Valor abaixo do que o encontrado por Moura (2008) para o PIMN, que foi de aproximadamente $5,5 \times 10^8$ m³. O valor aqui

encontrado é relativo a 6,29 % do valor encontrado para o aquífero aluvionar do rio Banabuiú (área de 83,4 km²), trecho entre Morada Nova e Limoeiro do Norte. Equilibrando-se o tamanho das áreas, o valor aqui encontrado seria relativo a cerca de 19,0 % do valor encontrado no PIMN.

Poderia se chegar a uma estimativa mais próxima da realidade se houvesse uma grande aplicação em conjunto de métodos geofísicos (SEVs) com os perfis litológicos dos poços, no entanto, os poços da região não possuem estes perfis.

5.5 Hidroquímica das Águas Superficiais

5.5.1 pH

As águas do Açude Banabuiú, e dos rios Banabuiú e Quixeramobim apresentaram para o período de 2010 a 2012 valores de pH alcalino (Tabela 16), com média de $8,1 \pm 0,3$. O menor valor observado foi de 6,8 à jusante do rio Quixeramobim (outubro/2011), já o maior valor observado foi de 9,3 à montante do rio Banabuiú (julho/2011). O rio Banabuiú apresentou um pH médio de 8,2, com menor valor de 7,1 e maior valor de 9,3. O rio Quixeramobim apresentou um pH médio de 8,0, com menor valor de 6,8 e maior valor de 8,8.

Notou-se que as águas do rio Banabuiú apresentam pH mais alcalino que as do rio Quixeramobim, principalmente no que diz respeito à jusante do mesmo. Também se observou que no período de chuva, o pH tende a ser mais ácido; Portanto, o comportamento do pH das águas do rio demonstra uma inter-relação com a intensidade de precipitações (Gráfico 09).

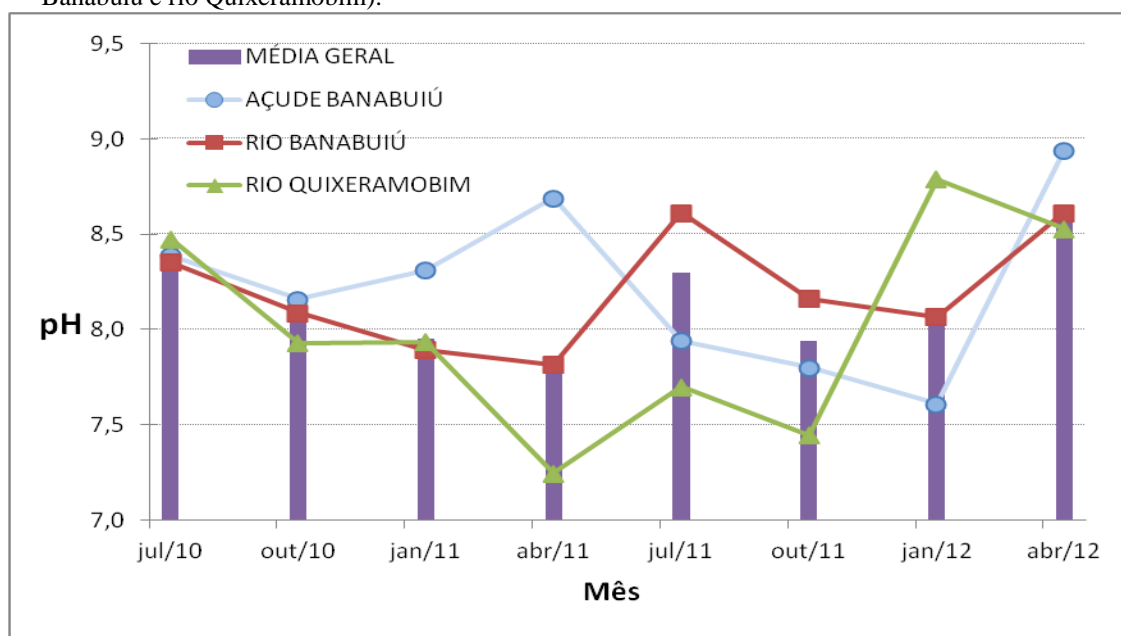
Tabela 16 – pH das águas superficiais (açude Banabuiú, rio Banabuiú e rio Quixeramobim) no período de coleta.

Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA pH	DESVIO PADRÃO
AB01	8,4	8,2	8,3	8,7	7,9	7,8	7,6	8,9	8,2	0,4
RB01	7,9	7,7	7,3	7,1	8,2	8,0	8,8	8,9	8,0	0,6
RB02	NC	8,4	8,5	7,9	9,3	8,6	NC	NC	8,5	0,5
RB03	8,1	7,9	8,4	7,8	8,7	8,1	8,0	8,7	8,2	0,3
RB04	8,3	8,4	8,1	8,6	8,5	8,2	7,6	8,9	8,3	0,4
RB05	8,9	8,2	7,9	8,1	NC	NC	NC	NC	8,3	0,4
RB06	8,7	7,8	7,2	7,4	8,3	7,9	7,9	8,0	7,9	0,5
RQ01	8,7	8,3	8,1	7,2	8,2	8,1	8,8	8,7	8,3	0,5
RQ02	8,2	7,6	7,7	7,3	7,3	6,8	NC	8,4	7,6	0,6
MÉDIA MENSAL	8,4	8,1	8,0	7,8	8,3	7,9	8,1	8,6	8,1	0,3

Fonte: O autor.

NC: Não Coletado.

Gráfico 09 – Média mensal do pH das águas superficiais (Média Geral, açude Banabuiú, rio Banabuiú e rio Quixeramobim).



Fonte: O autor.

Os elevados valores de pH (máximo de 9,3) no período seco estão relacionados à falta de renovação da água e mineralização da matéria orgânica, fazendo aumentar a concentração em nutrientes, o que leva a um aumento de micro algas (fitoplanctons), que durante o dia utilizam o CO_2 no processo de fotossíntese. O CO_2 é o principal fator de controle do pH, o consumo deste gás faz aumentar o pH da água.

5.5.2 Condutividade Elétrica

A condutividade elétrica (CE) da água depende de suas concentrações iônicas e da temperatura. Fornece, também, uma relação direta com a quantidade de sólidos dissolvidos adicionados à água (Costa, 1998).

A condutividade elétrica média a 25 °C das águas do açude Banabuiú, e dos rios Banabuiú e Quixeramobim para o período de 2010 a 2012 foi 439 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Tabela 17 e Gráfico 10). O menor valor observado foi 211 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à montante do rio Banabuiú (abril de 2011), já o maior valor observado foi 1018 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à montante do rio Quixeramobim (janeiro de 2012). O rio Banabuiú apresentou uma CE média de 370 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com menor valor de 211 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e maior valor de 450 $\mu\text{S}/\text{cm}$. O rio Quixeramobim apresentou uma CE média de 675 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com menor valor de 367 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e maior valor de 1018 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

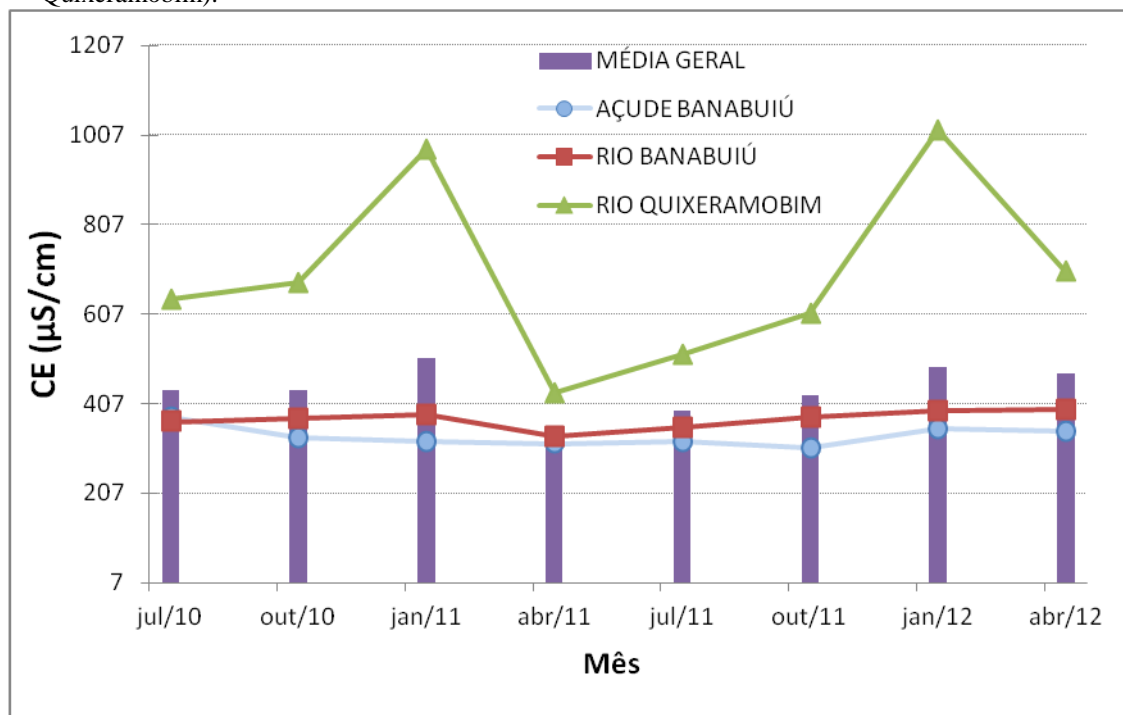
Tabela 17 – Condutividade elétrica em $\mu\text{S}/\text{cm}$ das águas superficiais (açude Banabuiú, rio Banabuiú e rio Quixeramobim) no período de coleta.

Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA CE
AB01	377	331	323	318	323	308	350	346	335
RB01	425	450	406	211	352	368	426	439	385
RB02	NC	371	373	349	342	392	NC	NC	365
RB03	340	337	338	336	331	339	368	359	344
RB04	334	343	341	351	341	355	379	360	351
RB05	354	358	401	367	NC	NC	NC	NC	370
RB06	380	384	435	391	401	427	390	417	403
RQ01	889	990	958	456	622	824	1018	979	842
RQ02	392	367	992	404	414	394	NC	424	484
MÉDIA MENSAL	436	437	507	354	391	426	489	475	439

Fonte: O autor.

NC: Não Coletado.

Gráfico 10 – Média mensal da CE das águas superficiais (açude Banabuiú, rio Banabuiú e rio Quixeramobim).



Fonte: O autor.

A salinidade da água, expressa em termos de condutividade elétrica, é mais elevada à jusante do rio Banabuiú, sendo que no rio Quixeramobim os valores de condutividade elétrica são mais elevados à montante. Este aumento nos valores de CE de montante para jusante do fluxo (após a mistura no açude, ou seja, na saída do rio Banabuiú até a chegada em Morada Nova) foi observado durante todo o período de estudo. Este aumento da condutividade elétrica à jusante deve-se à evaporação, pois, há uma razoável distância entre os locais (em torno de 10 km), e isto favorece o efeito da evaporação; e também devido ao próprio aporte dos rios e riachos que deságuam no rio Banabuiú.

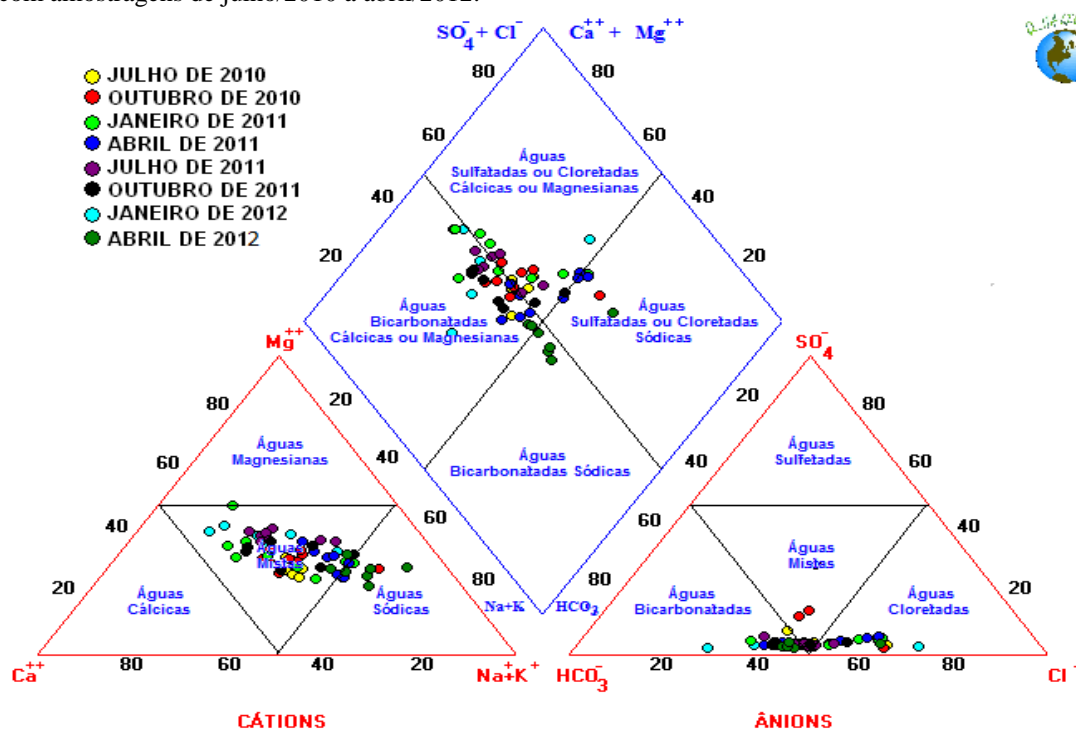
5.5.3 Classificação das Águas Superficiais pelos Íons Dominantes

Os tipos de águas encontradas para os rios Banabuiú e Quixeramobim foram classificados como bicarbonatadas cálcio-magnesianas (62,5 % das amostras), cloretadas cálcio-magnesianas (25 % das amostras) e em cloretadas sódicas (12,5 % das amostras), respectivamente. A água do açude Banabuiú foi classificada como bicarbonatada cálcio-magnesiana.

A ocorrência de maiores concentrações de águas cloretadas no rio Quixeramobim está relacionada ao meio geológico e à escassez das chuvas e a evaporação, que favorece a concentração desses sais nas águas. A predominância de águas cloretadas sódicas no rio Quixeramobim deve-se a forma dos compostos que são muito solúveis e tendem a se enriquecer juntamente com o sódio.

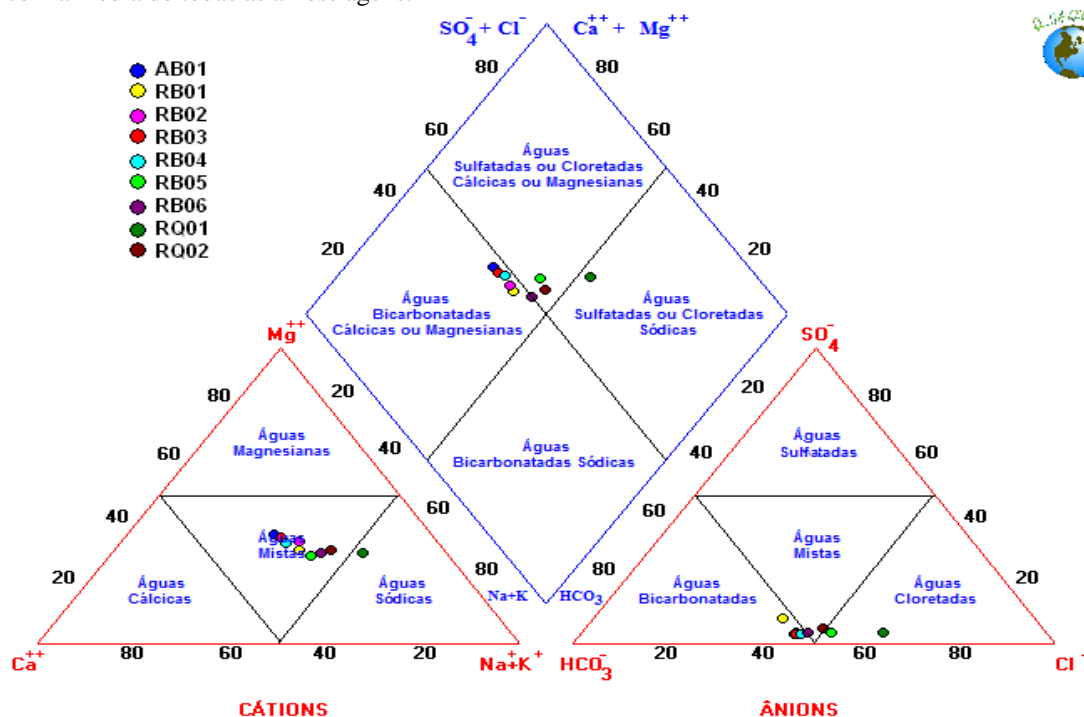
Como se vê do diagrama de *Piper* nas Figuras 17 e 18, o equilíbrio nos valores das concentrações dos cátions (valor médio) resultou no tipo cálcio-magnésiano dominante das águas superficiais. A distribuição dos cátions, por abundância de maior a menor, tem-se as seguintes relações na Tabela 18.

Figura 17 – Diagrama de *Piper* para as águas superficiais (açude Banabuiú, rio Banabuiú e rio Quixeramobim), com amostragens de julho/2010 a abril/2012.



Fonte: O autor.

Figura 18 – Diagrama de Piper para as águas superficiais (açude Banabuiú, rio Banabuiú e rio Quixeramobim), com a média de todas as amostragens.



Fonte: O autor.

Tabela 18 – Relações de abundância dos cátions das águas superficiais (açude Banabuiú, rio Banabuiú e rio Quixeramobim).

AMOSTRAS	RELAÇÃO DOS CÁTIONS
AB01	Mg > Ca > Na+K
RB01	Na+K > Mg > Ca
RB02	Na+K > Mg > Ca
RB03	Mg > Na+K > Ca
RB04	Na+K > Mg > Ca
RB05	Na+K > Mg > Ca
RB06	Na+K > Mg > Ca
RQ01	Na+K > Mg > Ca
RQ02	Na+K > Mg > Ca

Fonte: O autor.

A soma dos ânions bicarbonato e carbonato resultou no tipo predominante do rio Banabuiú de água bicarbonatada. O ânion dominante nas águas do rio Quixeramobim foi o cloreto, que segundo Gomes (2005), é típico das águas que escoam em terrenos cristalinos do Estado do Ceará.

As concentrações médias dos ânions para estas águas resultam nas seguintes relações expressas na Tabela 19.

Tabela 19 – Relações de abundância dos ânions das águas superficiais (açude Banabuiú, rio Banabuiú e rio Quixeramobim).

AMOSTRAS	RELAÇÃO DOS ÂNIONS
AB01	$\text{HCO}_3 + \text{CO}_3 > \text{Cl} > \text{SO}_4$
RB01	$\text{HCO}_3 + \text{CO}_3 > \text{Cl} > \text{SO}_4$
RB02	$\text{HCO}_3 + \text{CO}_3 > \text{Cl} > \text{SO}_4$
RB03	$\text{HCO}_3 + \text{CO}_3 > \text{Cl} > \text{SO}_4$
RB04	$\text{HCO}_3 + \text{CO}_3 > \text{Cl} > \text{SO}_4$
RB05	$\text{Cl} > \text{HCO}_3 + \text{CO}_3 > \text{SO}_4$
RB06	$\text{Cl} > \text{HCO}_3 + \text{CO}_3 > \text{SO}_4$
RQ01	$\text{Cl} > \text{HCO}_3 + \text{CO}_3 > \text{SO}_4$
RQ02	$\text{Cl} > \text{HCO}_3 + \text{CO}_3 > \text{SO}_4$

Fonte: O autor.

5.5.4 Classificação das Águas Superficiais pelo IQA

Através da média dos resultados dos parâmetros físicos, químicos e biológicos obtidos em abril e outubro de 2011 (Tabelas 20 e 21), foi determinado o índice de qualidade da água (IQA), este índice será visto mais adiante.

Tabela 20 – Parâmetros do IQA para as águas do açude Banabuiú, rio Banabuiú e rio Quixeramobim, período chuvoso (abril de 2011).

Amostras	Coliformes Fecais (U.F.C.)	pH	DBO (mg/L)	Nitrogênio Total (mg/L)	Fósforo Total (mg/L)	Temperatura (° C)	Turbidez (u.T.)	Resíduos Totais (mg/L)	Oxigênio Dissolvido (mg/L)
AB01	0,0	8,69	5,0	1,82	0,033	26,7	48,9	20,6	6,4
RB01	0,0	7,08	4,0	0,97	0,242	25,1	124,0	3,0	6,6
RB02	0,0	7,94	2,0	0,47	0,043	26,5	12,5	2,9	5,5
RB03	0,0	7,78	2,0	0,56	0,090	23,7	10,4	1,1	6,2
RB04	0,0	8,59	3,0	1,04	0,088	27,4	8,8	2,8	8,1
RB05	0,0	8,08	3,0	0,58	0,068	28,4	11,6	9,2	7,0
RB06	0,0	7,42	2,0	0,77	0,110	27,5	28,8	29,4	5,5
RQ01	0,0	7,24	2,0	1,21	0,132	26,0	18,9	1,4	4,6
RQ02	0,0	7,25	4,0	1,28	0,096	27,5	12,3	6,3	4,0

Fonte: O autor.

U.F.C.: Unidades Formadoras de Colônias.

u.T.: Unidades de Turbidez.

Tabela 21 – Parâmetros do IQA para as águas do açude Banabuiú, rio Banabuiú e rio Quixeramobim, período de estiagem (outubro de 2011).

Amostras	Coliformes Fecais (U.F.C.)	pH	DBO (mg/L)	Nitrogênio Total (mg/L)	Fósforo Total (mg/L)	Temperatura (° C)	Turbidez (u.T.)	Resíduos Totais (mg/L)	Oxigênio Dissolvido (mg/L)
AB01	0,0	7,80	2,0	0,84	0,005	23,9	9,0	9,0	2,9
RB01	0,0	7,98	3,0	0,70	0,009	26,1	18,2	9,3	3,7
RB02	0,0	8,57	7,0	0,83	0,006	26,7	10,0	13,2	4,0
RB03	0,0	8,13	4,0	0,79	0,005	23,9	7,0	1,0	3,1
RB04	1,0	8,23	3,0	0,70	0,005	24,7	7,6	5,3	4,0
RB05	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
RB06	0,0	7,90	2,0	0,65	0,014	26,3	14,9	6,9	3,5
RQ01	0,0	8,06	3,5	0,77	0,012	MNR	11,7	1,7	MNR
RQ02	0,0	6,83	4,0	0,73	0,005	MNR	8,3	4,9	MNR

Fonte: O autor.

NC: Não Coletado.

MNR: Medida Não Realizada.

U.F.C.: Unidades Formadoras de Colônias.

u.T.: Unidades de Turbidez.

Coliformes Totais e Fecais

Sabe-se que concentrações elevadas de microrganismos presentes na água podem determinar a deterioração da sua qualidade, como aparecimento de odores e sabores desagradáveis. E o mais importante, quantidades elevadas de bactérias podem causar risco sério a saúde dos consumidores.

Os organismos mais comumente utilizados como indicadores de contaminação fecal são as bactérias do grupo coliforme. A determinação da concentração de coliformes assume importância como parâmetro indicador da possibilidade da existência de microrganismos patogênicos, responsáveis pela transmissão de doenças de veiculação hídrica (CETESB, 2012).

Portanto, a presença de coliformes nas águas indica poluição, e grande risco da presença de microrganismos patogênicos.

As análises indicaram a presença de coliformes totais nos dois períodos estudados e em todas as amostras (Tabela 22), e coliformes fecais (01 unidade formadora de colônia) no período de estiagem (Tabelas 20 e 21); para água potável estes valores excedem o máximo permitido pela Portaria N° 2914 de 12 de dezembro de 2011 que é de ausência de coliformes termotolerantes em 100 mililitros. Ressalta-se que foi utilizado para as águas superficiais o uso da Portaria N° 2914 nos parâmetros coliformes e turbidez, e não da Resolução N° 357 do

CONAMA, pois a água superficial na região estudada é usada por vezes como abastecimento doméstico direto (sem passar por estação de tratamento) por parte da população ribeirinha.

Tabela 22 – Coliformes Totais para as águas do açude Banabuiú, rio Banabuiú e rio Quixeramobim.

Amostras	COLIFORMES TOTAIS (U.F.C.)	
	IQA ABRIL DE 2011	IQA OUTUBRO DE 2011
AB01	369	124
RB01	590	247
RB02	301	169
RB03	111	313
RB04	125	195
RB05	129	NC
RB06	199	262
RQ01	321	322
RQ02	327	310

Fonte: O autor.

NC: Não Coletado.

U.F.C.: Unidades Formadoras de Colônias.

Demanda Bioquímica de Oxigênio

Em águas naturais, a DBO representa a demanda potencial de oxigênio dissolvido que poderá ocorrer devido à estabilização dos compostos orgânicos biodegradáveis, o que poderá reduzir os níveis de oxigênio nas águas abaixo dos exigidos pela vida aquática. É um parâmetro imprescindível nos estudos de autodepuração dos cursos d'água e composição dos índices de qualidade dos mesmos (CETESB, 2012).

As análises mostraram que 47,0 % das amostras (Tabelas 20 e 21) possuem valores acima de 03 mg/L, ou seja, de acordo com a Resolução CONAMA Nº 357, de 17 de Março de 2005, apenas 53,0 % das amostras, analisando este parâmetro separadamente, se enquadram como Água Doce – Classe 01, própria ao abastecimento para consumo humano, após tratamento simplificado.

Nitrogênio Total

Segundo Von Sperling (2005), o nitrogênio é um constituinte de vários compostos biológicos. As fontes de contaminação desse composto em corpos d'água são de origem natural ou antropogênica, sendo a última a considerada mais importante, pois é constituída por despejos domésticos e industriais, excrementos de animais e fertilizantes.

As plantas aquáticas utilizam nitrogênio principalmente na síntese de proteínas e aminoácidos. As principais fontes de nitrogênio são: nitrato, nitrito, amônio, compostos nitrogenados dissolvidos, como ureia e aminoácidos livres e peptídeos (TUNDISI; TUNDISI, 2008, p. 288).

As análises mostraram que no período chuvoso, o açude Banabuiú (ambiente lântico) apresentou o maior valor de nitrogênio total, 1,82 mg/L, já o menor valor foi o da amostra do rio Banabuiú (ambiente lótico) RB02, com 0,47 mg/L (Tabelas 20 e 21). Em janeiro de 2007, segundo Hijo (2009), o açude Castanhão, localizado no Estado do Ceará, apresentou valor de nitrogênio total de 1,40 mg/L. Nota-se que ambos os estudos, os valores em ambiente lântico são elevados, isto ocorre, hipoteticamente, devido ao aporte de nutrientes de fora para dentro dos açudes, ou seja, de causa antrópica.

Fósforo Total

O fósforo é um elemento essencial para o funcionamento e para o crescimento das plantas aquáticas, uma vez que é componente de ácidos nucleicos e adenosina trifosfato. Fosfatos dissolvidos podem ser lixiviados de minerais, como a apatita. O ortofosfato dissolvido é a principal fonte de fósforo para as plantas aquáticas. Os sistemas terrestres não perturbados conservam fósforo, enquanto que em bacias hidrográficas onde ocorre desmatamento geralmente perdem fósforo (TUNDISI; TUNDISI, *op. cit.*, p. 287).

As análises mostraram que as águas superficiais possuem no período chuvoso valores mais elevados que no período de estiagem (Tabelas 20 e 21), apresentando maior valor no ponto de amostragem RB01, 0,242 mg/L, e menores valores, 0,005 mg/L, nos pontos AB01, RB03, RB04 e RQ02. De acordo com a Resolução CONAMA N° 357, de 17 de Março de 2005, todas as amostras do período de estiagem, analisando este parâmetro separadamente, se enquadram como Água Doce – Classe 01, própria ao abastecimento para consumo humano, após tratamento simplificado (valores menores que 0,020 mg/L). Já no período chuvoso, a água do açude Banabuiú enquadra-se como Água Doce – Classe 03, própria ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional ou avançado (valores menores que 0,050 mg/L).

Turbidez

Define-se turbidez como a dificuldade da água para transmitir a luz, provocada pelos sólidos em suspensão (silte, argila, matéria orgânica, microrganismos e partículas inorgânicas).

Sabe-se que a erosão que ocorre nas margens dos rios em períodos chuvosos é um exemplo de acontecimento que resulta no aumento da turbidez das águas. Outro exemplo são os esgotos sanitários e diversos efluentes (diversas fontes de poluição) que também provocam aumentos na turbidez das águas.

As análises mostraram que os valores de turbidez para todas as amostras (Tabelas 20 e 21) excedem o máximo permitido pela Portaria N° 2914 de 12 de dezembro de 2011 que é de 05 unidades de turbidez (u.T.).

Resíduos Totais

Para os recursos hídricos, os sólidos podem causar danos aos peixes e à vida aquática. Eles podem sedimentar no leito do rio, destruindo organismos que fornecem alimentos, ou também danificar os leitos de desova de peixes. Os sólidos podem reter bactérias e resíduos orgânicos no fundo dos rios, promovendo decomposição anaeróbia (CETESB, 2012).

As análises mostraram que o período chuvoso teve os valores mais elevado e mais baixo, o ponto RB06 apresentou o maior valor de resíduos totais, 29,4 mg/L, já o menor valor foi o do ponto de amostragem RB03, com 1,0 mg/L (Tabelas 20 e 21).

Oxigênio Dissolvido

De acordo com Von Sperling (2005), o oxigênio dissolvido é de vital importância para os organismos aeróbios. Durante a estabilização da matéria orgânica, as bactérias fazem uso do oxigênio nos seus processos respiratórios, podendo vir a causar uma redução da concentração do mesmo no meio. Dependendo da magnitude deste fenômeno, podem vir a morrer diversos seres aquáticos (incluindo os peixes). Caso o oxigênio seja totalmente consumido, tem-se a condição anaeróbia, com geração de maus odores. É o principal parâmetro de caracterização dos efeitos da poluição das águas por despejos orgânicos.

As análises mostraram que os períodos de chuva e de estiagem tiveram os valores mais elevado e mais baixo, respectivamente. O ponto de amostragem RB04 apresentou o maior valor de oxigênio dissolvido, 8,1 mg/L, já o menor valor foi o do açude Banabuiú (AB01), com 2,9 mg/L (Tabelas 20 e 21). Nota-se que os valores do período chuvoso são maiores que os valores do período de estiagem. Segundo Tundisi e Tundisi (2008), temperaturas mais elevadas na superfície da água causam perdas de oxigênio através da interface ar-água. Logo, isto explica os valores de oxigênio dissolvido reduzidos no período de estiagem.

A presença de oxigênio dissolvido na água (OD) é fundamental para o desenvolvimento dos peixes; teores entre 0 e 1 mg/L são letais, entre 2,5 e 3,5 os peixes sobrevivem sem estresse, e acima de 4,5 mg/L o aproveitamento da ração é melhor, doenças são raras e a água mais límpida. Na falta de OD na água podem se observar os peixes na superfície procurando respirar (SNATURAL, 2012).

Classificação do Índice de Qualidade de Água – IQA

Nota-se na Tabela 23 que todas as amostras foram classificadas como “boas”. As águas superficiais da região estudada tiveram um IQA que variou de 54 (RB01) a 73 (RB04 e RB05), ou seja, são consideradas boas para o abastecimento público, significando menos despesas com o tratamento de água. Nota-se que no período chuvoso (abril de 2011) os índices do açude Banabuiú e do rio Banabuiú tendem a ser melhores que no período de estiagem. Verifica-se, portanto, que mesmo os parâmetros possuindo uma classificação individual ruim em pelo menos um parâmetro do IQA, as águas superficiais foram consideradas boas.

Tabela 23 – Classificação do IQA, média entre abril e outubro de 2011 para as águas do açude Banabuiú, rio Banabuiú e rio Quixeramobim.

Amostras	IQA ABRIL DE 2011	IQA OUTUBRO DE 2011	CATEGORIA
AB01	63	62	Boa
RB01	54	63	Boa
RB02	70	65	Boa
RB03	70	62	Boa
RB04	73	65	Boa
RB05	73	INC	Boa
RB06	67	65	Boa
RQ01	65	INC	Boa
RQ02	63	INC	Boa

Fonte: O autor.

INC: Índice Não Calculado.

5.5.5 Qualidade das Águas para Consumo Humano e Irrigação

O estudo da qualidade das águas superficiais visa, principalmente, fornecer informações para eventuais e futuros planos de aproveitamento desses recursos para consumos básicos gerais, e também para controlar a qualidade da água atualmente consumida. Neste estudo foram usadas as principais características químicas da água, que definem sua adequação ao consumo humano, e aqueles considerados mais importantes, quando se pretende utilizá-la em atividades agrícolas.

As Tabelas (24 a 39) a seguir mostram os parâmetros físico-químicos das amostras de águas superficiais (açude Banabuiú, rio Banabuiú e rio Quixeramobim) no período de estudo. Os dados para a confecção Tabela 40 e discussões a seguir foram baseados a partir destas tabelas.

Tabela 24 – Concentração de Nitrogênio Amoniacal das águas superficiais.

NITROGÊNIO AMONICAL (N-NH ₄ ⁺) - mg/L									
Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA
AB01	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
RB01	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
RB02	NC	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	NC	NC	0,0
RB03	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
RB04	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
RB05	0,0	0,0	0,0	0,0	NC	NC	NC	NC	0,0
RB06	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
RQ01	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
RQ02	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	NC	0,0	0,0

Fonte: O autor.

NC: Não Coletado.

Valor Máximo Permitido de Nitrogênio Amoniacal (N-NH₄⁺) - 1,5 mg/L.

Tabela 25 – Concentração de Cálcio das águas superficiais.

CÁLCIO (Ca ⁺⁺) - mg/L									
Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA
AB01	18	21	21	18	18	22	19	19	19
RB01	24	22	24	08	18	22	24	19	20
RB02	NC	18	19	16	18	16	NC	NC	17
RB03	18	19	22	18	16	21	24	16	19
RB04	18	21	19	18	18	21	19	18	19
RB05	21	19	19	14	NC	NC	NC	NC	18
RB06	19	18	19	19	19	21	19	18	19
RQ01	37	30	32	21	21	26	29	18	27
RQ02	21	24	32	18	16	19	NC	16	21

Fonte: O autor.

NC: Não Coletado.

Tabela 26 – Concentração de Ferro das águas superficiais.

FERRO (Fe) - mg/L									
Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA
AB01	0,2	0,1	0,1	0,4	0,2	< 0,1	0,4	0,1	0,2
RB01	1,3	2,2	0,4	3,5	2,3	< 0,1	0,5	0,2	1,5
RB02	NC	0,1	0,2	0,2	0,5	< 0,1	NC	NC	0,3
RB03	0,2	0,1	0,1	0,5	0,2	< 0,1	0,1	0,1	0,2
RB04	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	< 0,1	0,8	0,1	0,2
RB05	0,2	0,1	0,2	0,8	NC	NC	NC	NC	0,3
RB06	0,2	0,2	1,7	1,4	0,8	< 0,1	1,1	0,3	0,8
RQ01	0,3	0,2	0,2	1,2	0,3	< 0,1	0,9	0,3	0,5
RQ02	0,5	1,2	0,8	0,4	0,2	0,0	NC	0,5	0,5

Fonte: O autor.

< 0,1: Limite de Detecção.

Em negrito: Valores Acima do Permitido Pela Portaria N° 2914 do Ministério da Saúde.

NC: Não Coletado.

Valor Máximo Permitido de Ferro - 0,3 mg/L.

Tabela 27 – Concentração de Magnésio das águas superficiais.

MAGNÉSIO (Mg⁺⁺) - mg/L									
Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA
AB01	11	11	18	15	12	12	12	13	13
RB01	12	13	14	09	12	11	15	13	12
RB02	NC	12	11	13	12	14	NC	NC	12
RB03	11	12	12	14	13	12	13	17	13
RB04	11	11	9	14	13	12	13	13	12
RB05	10	12	11	13	NC	NC	NC	NC	11
RB06	11	13	10	12	13	13	17	15	13
RQ01	24	36	30	13	25	30	30	38	28
RQ02	10	11	32	16	17	13	NC	17	17

Fonte: O autor.

NC: Não Coletado.

Tabela 28 – Concentração de Sódio das águas superficiais.

SÓDIO (Na⁺) - mg/L									
Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA
AB01	23	17	8	26	11	14	06	38	18
RB01	28	29	14	22	14	23	20	61	27
RB02	NC	25	17	33	14	27	NC	NC	23
RB03	23	17	10	29	14	14	06	42	19
RB04	21	19	10	29	14	14	13	42	20
RB05	27	23	25	40	NC	NC	NC	NC	29
RB06	28	25	32	47	18	36	20	58	33
RQ01	90	135	87	47	53	81	72	151	89
RQ02	29	25	98	40	32	17	NC	58	43

Fonte: O autor.

NC: Não Coletado.

Valor Máximo Permitido de Sódio - 200 mg/L.

Tabela 29 – Concentração de Potássio das águas superficiais.

POTÁSSIO (K⁺) - mg/L									
Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA
AB01	03	04	05	04	05	06	06	08	05
RB01	04	06	06	04	03	06	06	10	06
RB02	NC	04	05	04	03	06	NC	NC	04
RB03	03	04	05	06	05	04	06	10	05
RB04	02	04	05	06	05	04	06	10	05
RB05	03	04	05	04	NC	NC	NC	NC	04
RB06	03	04	04	04	03	07	10	11	06
RQ01	03	08	07	04	05	07	06	19	08
RQ02	03	05	08	06	05	06	NC	13	06

Fonte: O autor.

NC: Não Coletado.

Tabela 30 – Concentração de Bicarbonato das águas superficiais.

BICARBONATO (HCO₃) - mg/L									
Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA
AB01	94	136	108	104	99	123	108	128	112
RB01	113	113	163	54	104	108	173	148	122
RB02	NC	108	104	108	94	104	NC	NC	104
RB03	94	99	108	143	99	108	113	118	110
RB04	94	108	99	108	104	113	113	118	107
RB05	84	108	104	89	NC	NC	NC	NC	96
RB06	99	111	84	79	104	108	256	133	122
RQ01	177	202	192	99	153	192	138	207	170
RQ02	148	113	192	113	108	118	NC	153	135

Fonte: O autor.

NC: Não Coletado.

Tabela 31 – Concentração de Cloreto das águas superficiais.

CLORETO (Cl) - mg/L									
Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA
AB01	50	60	54	56	50	52	58	62	55
RB01	54	66	56	34	40	46	62	68	53
RB02	NC	54	56	50	52	44	NC	NC	51
RB03	50	58	66	56	48	46	56	58	55
RB04	52	54	60	60	48	50	58	60	55
RB05	58	60	72	68	NC	NC	NC	NC	64
RB06	60	60	76	88	64	64	58	64	67
RQ01	210	230	210	98	110	158	226	230	184
RQ02	64	60	220	60	62	52	NC	74	85

Fonte: O autor.

NC: Não Coletado.

Valor Máximo Permitido de Cloreto - 250 mg/L.

Tabela 32 – Concentração de Fluoreto das águas superficiais.

FLUORETO (F⁻) - mg/L									
Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA
AB01	0,1	0,6	0,3	0,2	0,2	0,1	0,2	0,6	0,3
RB01	0,2	0,3	0,2	0,1	0,2	0,2	0,3	1,0	0,3
RB02	NC	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	NC	NC	0,2
RB03	0,1	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1	0,3	0,5	0,2
RB04	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,3	0,5	0,2
RB05	0,1	0,2	0,2	0,2	NC	NC	NC	NC	0,2
RB06	0,1	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,8	0,3
RQ01	0,3	0,5	0,5	0,2	0,3	0,3	0,6	0,8	0,4
RQ02	0,1	0,2	0,5	0,2	0,2	0,2	NC	0,5	0,3

Fonte: O autor.

NC: Não Coletado.

Valor Máximo Permitido de Fluoreto - 1,5 mg/L.

Tabela 33 – Concentração de Ortofosfato das águas superficiais.

ORTOFOSFATO (PO ₄ ⁻) - mg/L									
Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA
AB01	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
RB01	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
RB02	NC	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	NC	NC	0,0
RB03	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1
RB04	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
RB05	0,0	0,0	0,0	0,0	NC	NC	NC	NC	0,0
RB06	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1	0,0	0,0	0,0	0,2
RQ01	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1
RQ02	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	NC	0,0	0,0

Fonte: O autor.

NC: Não Coletado.

Tabela 34 – Concentração de Nitrato das águas superficiais.

NITRATO (N-NO ₃ ⁻) - mg/L									
Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA
AB01	0,3	0,6	< 0,1	< 0,1	0,1	< 0,1	0,2	< 0,1	0,3
RB01	1,0	1,9	0,3	< 0,1	0,8	< 0,1	2,3	1,1	1,2
RB02	NC	0,8	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,1	NC	NC	0,4
RB03	0,7	0,8	< 0,1	0,7	< 0,1	0,1	0,3	< 0,1	0,5
RB04	0,4	0,6	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,2	0,2	0,2	0,3
RB05	0,1	0,2	< 0,1	< 0,1	NC	NC	NC	NC	0,2
RB06	< 0,1	< 0,1	0,2	< 0,1	< 0,1	0,1	0,1	< 0,1	0,1
RQ01	0,4	0,6	< 0,1	-0,2	< 0,1	1,2	0,1	0,3	0,4
RQ02	0,5	0,9	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	NC	< 0,1	0,7

Fonte: O autor.

< 0,1: Limite de Detecção.

NC: Não Coletado.

Valor Máximo Permitido de Nitrato (N-NO₃⁻) - 10 mg/L.

Tabela 35 – Concentração de Nitrito das águas superficiais.

NITRITO (N-NO ₂ ⁻) - mg/L									
Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA
AB01	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
RB01	0,00	0,03	< 0,02	0,10	< 0,02	< 0,02	0,06	< 0,02	0,05
RB02	NC	< 0,02	< 0,02	0,00	< 0,02	< 0,02	NC	NC	< 0,02
RB03	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,00	< 0,02	< 0,02
RB04	0,00	< 0,02	< 0,02	0,00	< 0,02	< 0,02	0,00	< 0,02	< 0,02
RB05	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,00	NC	NC	NC	NC	< 0,02
RB06	< 0,02	< 0,02	0,01	0,12	< 0,02	0,01	0,54	< 0,02	0,17
RQ01	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,02	< 0,02	< 0,02	0,00	< 0,02	< 0,02
RQ02	< 0,02	0,01	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	NC	< 0,02	< 0,02

Fonte: O autor.

< 0,02: Limite de Detecção.

NC: Não Coletado.

Valor Máximo Permitido de Nitrito (N-NO₂⁻) - 1,0 mg/L.

Tabela 36 – Concentração de Sulfato das águas superficiais.

SULFATO (SO ₄ ⁻) - mg/L									
Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA
AB01	03	03	03	03	03	03	03	03	03
RB01	12	28	06	37	07	04	03	02	12
RB02	NC	03	03	04	03	03	NC	NC	03
RB03	03	03	02	03	02	03	02	03	02
RB04	04	03	02	02	02	02	01	01	02
RB05	03	03	02	05	NC	NC	NC	NC	03
RB06	04	03	06	09	03	03	01	02	04
RQ01	07	02	13	09	05	09	05	11	08
RQ02	05	22	18	03	02	03	NC	06	09

Fonte: O autor.

NC: Não Coletado.

Valor Máximo Permitido de Sulfato - 250 mg/L.

Tabela 37 – Concentração de Sílica das águas superficiais.

SÍLICA (SiO ₂) - mg/L									
Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA
AB01	10	10	12	11	10	07	09	08	09
RB01	14	12	16	18	09	08	10	08	12
RB02	NC	07	12	12	06	08	NC	NC	09
RB03	10	10	12	12	10	08	09	04	09
RB04	10	09	12	12	10	10	09	05	10
RB05	10	08	12	14	NC	NC	NC	NC	11
RB06	11	09	13	15	11	10	10	08	11
RQ01	17	14	16	14	17	13	14	14	15
RQ02	11	12	16	08	09	10	NC	07	10

Fonte: O autor.

NC: Não Coletado.

Tabela 38 – Concentração de Alcalinidade Total das águas superficiais.

ALCALINIDADE TOTAL - mg/L									
Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA
AB01	77	111	89	85	81	101	89	105	92
RB01	93	93	133	44	85	89	141	121	100
RB02	NC	89	85	89	77	85	NC	NC	85
RB03	77	81	89	117	81	89	93	97	90
RB04	77	89	81	89	85	93	93	97	88
RB05	69	89	85	73	NC	NC	NC	NC	79
RB06	81	91	69	65	85	89	210	109	100
RQ01	145	166	158	81	125	158	113	170	139
RQ02	121	93	158	93	89	97	NC	125	111

Fonte: O autor.

NC: Não Coletado.

Tabela 39 – Concentração de Dureza Total das águas superficiais.

DUREZA TOTAL - mg/L									
Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA
AB01	88	96	128	108	96	104	100	104	103
RB01	108	112	120	56	96	100	124	104	103
RB02	NC	96	92	96	92	100	NC	NC	95
RB03	88	96	104	104	96	100	116	112	102
RB04	88	96	84	104	100	100	104	100	97
RB05	92	96	92	92	NC	NC	NC	NC	93
RB06	92	100	88	100	104	108	120	108	103
RQ01	192	224	204	108	156	188	196	204	184
RQ02	92	104	212	112	112	104	NC	112	121

Fonte: O autor.

NC: Não Coletado.

Valor Máximo Permitido de Dureza Total - 500 mg/L.

Adequação para Consumo Humano

Geralmente, as águas são consideradas potáveis quando podem ser ingeridas pelo homem sem que ocasionem prejuízos a sua saúde. As características químicas das águas para consumo humano são regulamentadas através de legislação específica, onde são estabelecidos limites máximos desejáveis e admissíveis para cada propriedade ou constituinte químico, adotaram-se neste estudo as normas propostas pelo Ministério da Saúde (Portaria N° 2914 de 12 de dezembro de 2011).

Foi procedida uma análise dos elementos físico-químicos, com base nos padrões de potabilidade da água. Na Tabela 40 estão os limites de potabilidade, quantidade de amostras e seus respectivos percentuais. Na Portaria N° 2914, os parâmetros, íons Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , HCO_3^- , $\text{CO}_3^{=}$, PO_4^{3-} e SiO_2 , não são considerados.

Tabela 40 – Potabilidade das águas superficiais (açude Banabuiú, rio Banabuiú e rio Quixeramobim), de acordo com a Portaria nº 2914 do Ministério da Saúde.

PARÂMETRO	ÁGUAS SUPERFICIAIS	
	QUANT.	%
Na⁺		
* < 200	64	100
> 200	0	0
F⁻		
* < 1,5	64	100
> 1,5	0	0
Fe		
* < 0,3	37	58
> 0,3	27	42
Cl⁻		
* < 250	64	100
> 250	0	0
SO₄⁻		
* < 250	64	100
> 250	0	0
NO₃⁻		
* < 10	64	100
> 10	0	0
NO₂⁻		
* < 1,0	64	100
> 1,0	0	0
NH₄⁺		
* < 1,5	64	100
> 1,5	0	0
DUREZA TOTAL		
* < 500	64	100
> 500	0	0
STD		
* < 1000	64	100
> 1000	0	0
pH		
* 6,0 - 9,5	64	100
< 6,0 e > 9,5	0	0

Fonte: O autor.

* = Padrão de aceitação para consumo humano de acordo com a portaria nº 2914/2011 – Ministério da Saúde.

Quant. = número de amostras por categoria.

(%) = percentual de amostras por categoria.

Analisando a Tabela 40, para os parâmetros sódio, fluoreto, cloreto, sulfato, dureza total, pH e STD das águas superficiais (açude Banabuiú, rio Banabuiú e rio Quixeramobim), observa-se que 100 % das amostras estão dentro do limite recomendado, tanto no período seco como no chuvoso. Também não foram observadas concentrações de nitrato, nitrito e nitrogênio amoniacal acima do limite recomendado, o que evidencia que a

região não desenvolve uma atividade agrícola forte, ou seja, uma atividade agrícola com uso exagerado de fertilizantes, sendo assim, a agricultura na área não está prejudicando a água superficial.

Cerca de 58 % das amostras apresentaram concentrações em ferro acima do limite recomendado. Durante épocas secas e chuvosas, 42 % das amostras estiveram abaixo do limite excessivo. O percentual de amostras com teor excessivo foi observado, principalmente, no período chuvoso. O ferro em concentrações superiores a 01 mg.L^{-1} pode produzir sabor desagradável, turbidez e manchas em tecidos e porcelanas. Nas águas superficiais, o nível de ferro aumenta nas estações chuvosas devido ao carreamento de solos ricos neste elemento e a ocorrência de processos de erosão das margens (CETESB, 2012). A borda da área dos aluviões estudados engloba rochas cristalinas (ricas em ferro), provavelmente devido a isto, ocorra índices elevados de Fe nas águas superficiais e subterrâneas, por escoamento e lixiviação.

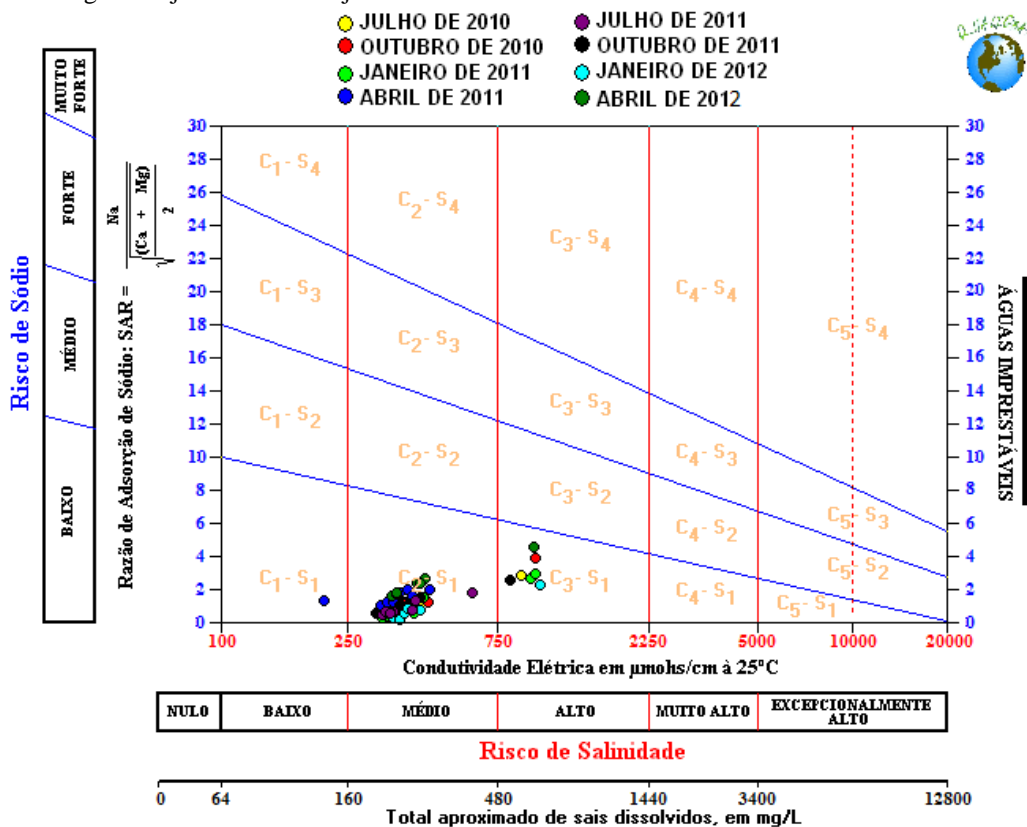
Adequação Para Irrigação

Reconhece-se que a avaliação da qualidade da água utilizada na irrigação é imprescindível, sobretudo em regiões áridas e semiáridas caracterizadas por baixos índices pluviométricos, distribuição irregular das chuvas ao longo do ano e intensa evapotranspiração. Essas condições favorecem o processo de salinização e sodificação, isto é, a acumulação gradativa de sais solúveis e/ou sódio trocável, na zona radicular das plantas dos solos irrigados (SILVA *et al.*, 2011, p. 2).

As águas superficiais e subterrâneas na área de estudo são utilizadas na agricultura irrigada, uma das atividades mais importantes na região. O potencial da água para fins de irrigação é determinado pela concentração em determinados constituintes específicos tais como os boratos, sulfatos e cloretos, e também dos sais dissolvidos e sódio, correlacionáveis à condutividade elétrica, que terá seus efeitos sobre os vegetais e sobre os solos, portanto, merecendo estudos detalhados inerentes a cada espécie de planta no que diz respeito a sua tolerância aos sais, devendo-se levar também em consideração as características do próprio solo. Portanto, qualquer sistema de classificação deve levar em conta o efeito da água de irrigação nas plantas e no solo.

A adequação da água para irrigação dependerá, em grande parte, de uma drenagem apropriada do solo e da remoção dos sais (Figura 19).

Figura 19 – Classificação das águas superficiais para fins de irrigação, segundo o diagrama do USSL, com amostragens de julho de 2010 a janeiro de 2012.



Fonte: O autor.

Considerando apenas o STD das águas do rio Banabuiú e açude Banabuiú (Tabela 41) como critério para uso na irrigação (Quadro 04), pode-se concluir que as águas não provocam efeitos nocivos, devido à concentração de STD estar sempre abaixo dos 500 mg.L^{-1} . Apenas no período de estiagem, a qualidade da água para irrigação tende a piorar, sem exceder a faixa de 500 mg.L^{-1} em STD. Já a água do rio Quixeramobim apresentou STD médio de 576 mg.L^{-1} (considerada como água salobra pela *Environmental Protection Agency* – EPA) como se observa na Tabela 41.

Tabela 41 – Concentração de STD médio das águas superficiais (açude Banabuiú, rio Banabuiú e rio Quixeramobim).

Amostras	STD (mg/L)	Classificação
AB01	233	Água Doce
RB01	264	Água Doce
RB02	256	Água Doce
RB03	239	Água Doce
RB04	244	Água Doce
RB05	259	Água Doce
RB06	281	Água Doce
RQ01	576	Água Salobra
RQ02	346	Água Doce

Fonte: O autor.

Quadro 04 – Limites de STD para irrigação, propostos pela *Environmental Protection Agency* – EPA.

Águas que não provocam efeitos nocivos.	STD	Até 500 mg.L ⁻¹
Águas que podem ter efeitos nocivos sobre culturas sensíveis.		500 - 1000 mg.L ⁻¹
Águas que podem ter efeitos nocivos e requerem uma prática de irrigação controlada.		1000 - 2000 mg.L ⁻¹
Águas que podem ser utilizadas apenas em plantas tolerantes, sobre solos permeáveis e usando uma prática de irrigação controlada.		2000 - 5000 mg.L ⁻¹

Fonte: Thorne e Peterson (1985).

O risco do sódio, expresso através do índice RAS (Razão de Adsorção de Sódio) pode ser baixo, médio, alto e muito alto. Como o efeito do sódio pode variar em função da condutividade, para uma classificação mais rigorosa do risco de sódio na água de irrigação, o Laboratório de Salinidade dos Estados Unidos (USSL) propôs o uso do diagrama que leva em consideração a condutividade elétrica e o índice RAS.

Aplicando o método do USSL (Figura 19), as águas superficiais, da área de estudo, foram classificadas conforme mostrado na Tabela 42.

Tabela 42 – Classes de água para fins de irrigação dos açude Banabuiú, e rios Banabuiú e Quixeramobim durante todas as etapas de campo (julho/2010 a abril/2012).

CLASSE	NÚMERO DE AMOSTRAS	%
C ₁ - S ₁	01	1,6
C ₂ - S ₁	56	87,5
C ₃ - S ₁	07	10,9
TOTAL	64	100

Fonte: O autor.

Da observação dos valores da Tabela 42, pode-se verificar que a maioria das amostras (87,5 %) pertence à categoria C₂S₁, representando águas com salinidade média e baixo risco de sódio, que podem ser usadas, sem muito problema, na irrigação.

A classe C_1S_1 ocorreu após eventos de elevada pluviosidade, com mais que 150 mm, portanto, sendo representada por uma amostra (RB01) durante o período de estudo; as outras amostras também reduziram seus valores, porém, não suficientemente para reduzirem suas classes. A classe C_1S_1 representa águas de baixa salinidade, podendo ser aplicadas na maioria das culturas e solos.

A classe C_3S_1 representa águas com risco de salinidade alta e baixo risco de sódio, foi representada por seis amostras durante o período de estudo. Assim sendo, a utilização dessas águas fica limitada, na maioria dos casos, pela categoria de salinidade (C_3), exigindo cuidados na sua utilização. Águas da categoria C_3 não podem ser utilizadas em solos com drenagem deficiente e devem ser aplicadas somente em culturas com uma alta tolerância ao sal. Esta classe foi observada apenas no rio Quixeramobim.

5.6 Hidroquímica do Domínio Hidrogeológico Cristalino

As análises referem-se a amostras de águas coletadas em 06 poços com profundidades que variam entre 60 e 78 metros.

5.6.1 pH

As águas do domínio hidrogeológico cristalino apresentaram pH entre 7,1 e 7,9 (médias mensais), portanto ficaram sempre abaixo do pH médio mensal das águas superficiais (Tabela 43). As águas do domínio hidrogeológico cristalino apresentaram, na maior parte do ano, valores de pH alcalino (Gráfico 11), com média de $7,5 \pm 0,3$, com ressalva do local PC04, que apresentou valores ácidos quase o período inteiro, provavelmente por encontrar-se em outro litotipo. O menor e o maior valor foram observados respectivamente em jan/11 no local (PC04), com o valor de 5,8 e em jul/11 no local (PCPC02) com o valor de 8,6.

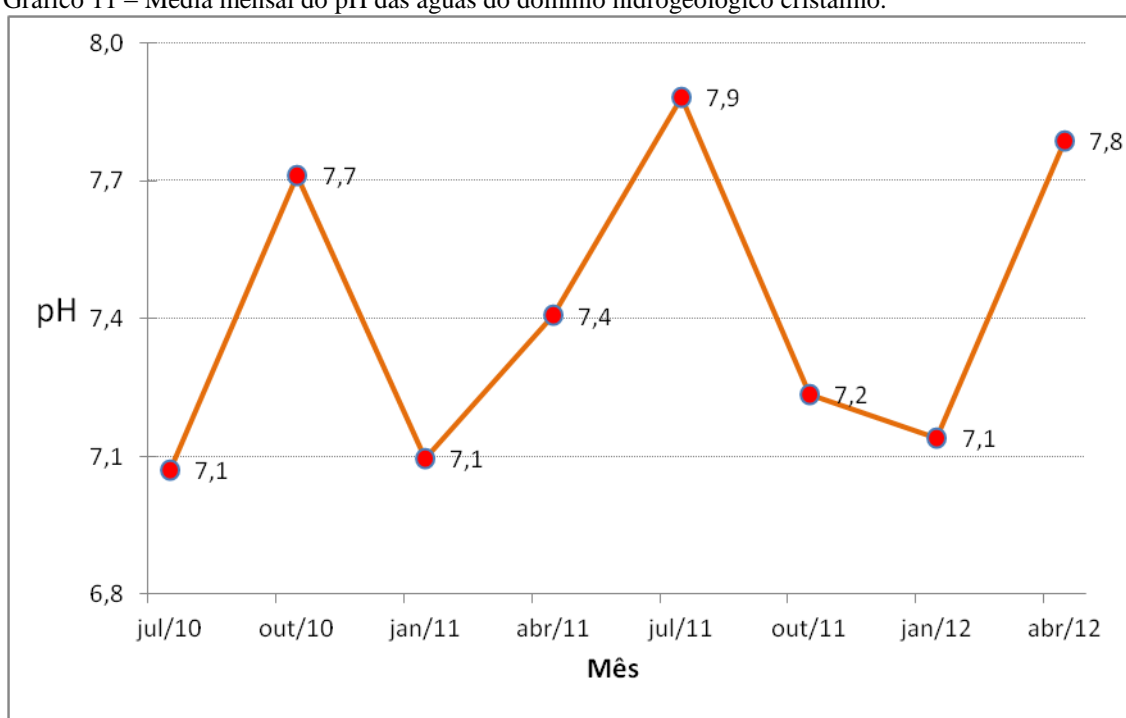
Tabela 43 - pH das águas do domínio hidrogeológico cristalino no período de coleta.

Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA pH	DESVIO PADRÃO
PC01	7,1	7,1	6,8	NC	7,3	7,0	7,1	7,4	7,1	0,2
PC02	NC	8,2	7,7	NC	8,6	8,2	NC	8,5	8,3	0,3
PC03	NC	8,3	NC	8,3	7,2	6,8	NC	7,5	7,6	0,7
PC04	NC	7,8	5,8	6,2	NC	7,0	NC	NC	6,7	0,9
PC05	NC	7,6	8,1	7,7	8,5	NC	NC	NC	7,9	0,4
PC06	NC	7,2	NC	NC	NC	NC	NC	NC	7,2	0,0
MÉDIA MENSAL	7,1	7,7	7,1	7,4	7,9	7,2	7,1	7,8	7,5	0,3

Fonte: O autor.

NC: Não Coletado.

Gráfico 11 – Média mensal do pH das águas do domínio hidrogeológico cristalino.



Fonte: O autor.

Observou-se que no período chuvoso as águas dos poços no domínio hidrogeológico cristalino tendem a se tornar menos alcalinas, isto provavelmente está relacionado a uma recarga direta de água ácida da chuva neste domínio.

5.6.2 Condutividade Elétrica

A condutividade elétrica média das águas dos poços do domínio hidrogeológico cristalino para o período estudado foi $4.428 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ a 25°C (Tabela 44). O menor e o maior valor foram observados respectivamente em abril de 2011 no local (PC05), com o valor de $411 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ e em julho de 2011 no local (PC03) com o valor de $11.940 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. A maioria dos valores médios mais baixos foram observados nos meses de chuva, sugerindo variações sazonais causadas por uma recarga com água de chuva, e aumento nos meses seguintes.

Tabela 44 – Condutividade elétrica das águas dos poços do domínio hidrogeológico cristalino em $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.

Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA CE
PC01	4870	4840	4900	NC	4860	2740	4710	4540	4494
PC02	NC	5590	5690	NC	5860	3930	NC	5810	5376
PC03	NC	6290	NC	5980	11940	9310	NC	10880	8880
PC04	NC	1287	640	451	NC	1951	NC	NC	1082
PC05	NC	415	460	411	461	NC	NC	NC	437
PC06	NC	5730	NC	NC	NC	NC	NC	NC	SM
MÉDIA MENSAL	SM	4025	2923	2281	5780	4483	SM	7077	4428

Fonte: O autor.

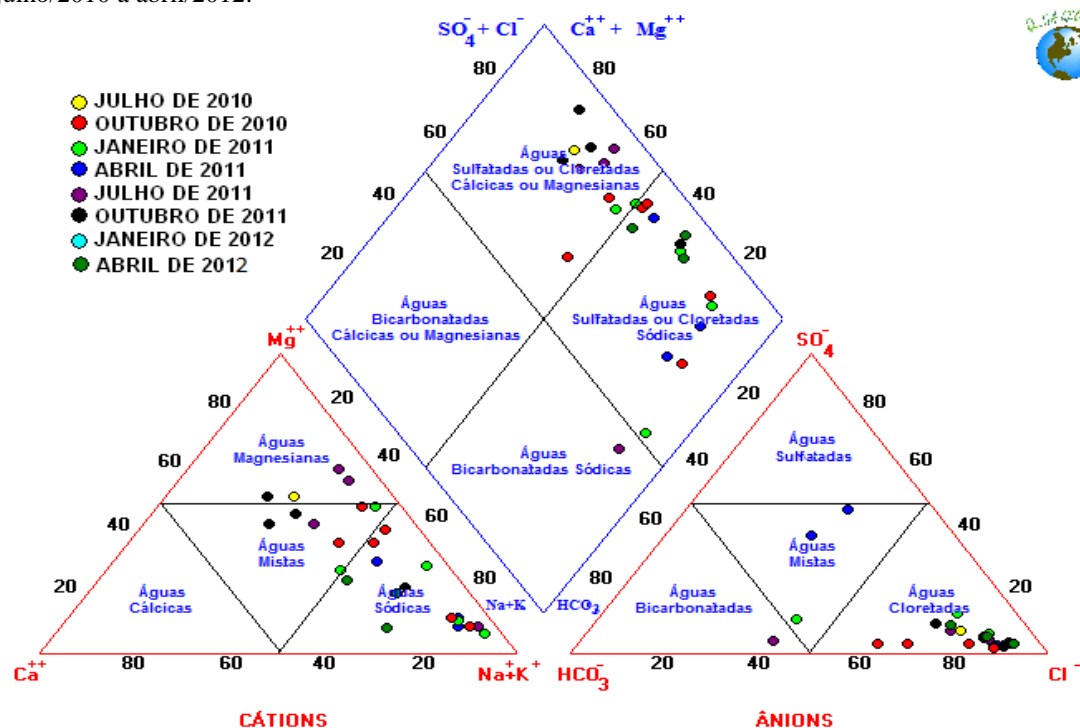
NC: Não Coletado.

SM: Sem Média.

5.6.3 Classificação das Águas do Domínio Hidrogeológico Cristalino pelos Íons Dominantes

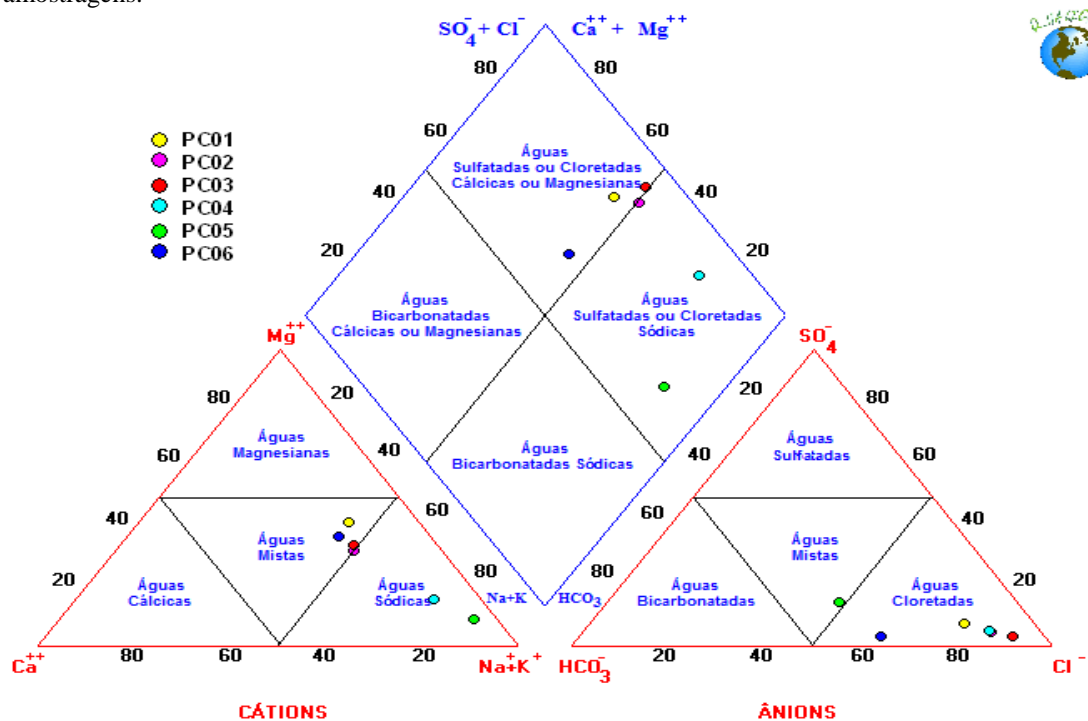
Os tipos de águas encontradas para o domínio hidrogeológico cristalino foram classificados em cloretadas cálcio-magnesianas (50 %), e em cloretadas sódicas (50 %), de acordo com a média de todos os poços (Figuras 20 e 21).

Figura 20 – Diagrama de *Piper* para as águas do domínio hidrogeológico cristalino, com amostragens de julho/2010 a abril/2012.



Fonte: O autor.

Figura 21 – Diagrama de *Piper* para as águas do domínio hidrogeológico cristalino, com a média de todas as amostragens.



Fonte: O autor.

O equilíbrio nos valores das concentrações dos cátions (valor médio) resultou nos tipos sódico e cálcio-magnésiano das águas do domínio hidrogeológico cristalino. A distribuição dos cátions, por abundância de maior a menor, se encontra nas seguintes relações na Tabela 45.

Tabela 45 – Relações de abundância dos cátions das águas do domínio hidrogeológico cristalino.

AMOSTRAS	RELAÇÃO DOS CÁTIONS
PC01	Mg > Na+K > Ca
PC02	Na+K > Mg > Ca
PC03	Na+K > Mg > Ca
PC04	Na+K > Mg > Ca
PC05	Na+K > Mg > Ca
PC06	Na+K > Mg > Ca

Fonte: O autor.

A água do rio Quixeramobim é semelhante à água do domínio hidrogeológico cristalino. Estas águas têm o magnésio como segundo cátion mais abundante, isto ocorre devido à litologia do cristalino, no qual o rio escoar, que deve ser rica em Mg (hipótese não comprovada).

O ânion dominante nas águas do domínio hidrogeológico cristalino foi o cloreto, com concentração média de 1.257 mg.L^{-1} , o que evidencia que a água escoar em terrenos cristalinos, visto que as cloretadas são típicas do domínio hidrogeológico cristalino no Estado do Ceará; as águas armazenadas em fraturas de rochas cristalinas são geralmente cloretadas. No entanto, este cloreto elevado pode ter sido aerotransportado (aerossóis marinhos) e se depositado durante a percolação das águas das chuvas (suposição pouco provável devido a distância de 160 km aproximadamente da costa), assim como mostram estudos realizados por Santiago (1984) e Rebouças (1973) *apud* Santiago, *op. cit.*

A concentração média dos ânions para estas águas resulta na relação expressa na Tabela 46.

Tabela 46 – Relações de abundância dos ânions das águas do domínio hidrogeológico cristalino.

AMOSTRAS	RELAÇÃO DOS ÂNIONS
PC01	Cl > HCO ₃ +CO ₃ > SO ₄
PC02	Cl > HCO ₃ +CO ₃ > SO ₄
PC03	Cl > HCO ₃ +CO ₃ > SO ₄
PC04	Cl > HCO ₃ +CO ₃ > SO ₄
PC05	Cl > HCO ₃ +CO ₃ > SO ₄
PC06	Cl > HCO ₃ +CO ₃ > SO ₄

Fonte: O autor.

Os íons apresentam pequenas variações temporais, sem demonstrarem um padrão de comportamento.

Lopes *et al.* (2008), apresentaram para o domínio hidrogeológico cristalino do município de Ocara/Ceará, águas fortemente enriquecidas em cloreto, e também ricas em sódio, e Moura (2008) apresentou resultados semelhantes no domínio hidrogeológico cristalino do PIMN.

Segundo Santos *in*: Feitosa *et al.* (2008), o cloreto é altamente solúvel, e muito estável em solução, então dificilmente é precipitado, e o sódio ocorre principalmente sob a forma de cloretos nas águas subterrâneas e sua fonte em rochas ígneas são essencialmente os feldspatos, plagioclásios, feldspatóides (nefelina e sodalita), anfíbios e piroxênios.

As Tabelas 47 a 62 mostram os parâmetros físico-químicos das amostras de águas do domínio hidrogeológico cristalino no período de estudo. Os dados para a confecção dos diagramas de *Piper* foram utilizados a partir destas tabelas, e estas serviram de embasamento para as discussões a seguir sobre adequações da água para consumo humano e irrigação.

Tabela 47 – Concentração de Nitrogênio Amoniacal do domínio hidrogeológico cristalino.

NITROGÊNIO AMONICAL (N-NH ₄ ⁺) - mg/L									
Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA
PC01	0,1	0,0	0,0	NC	0,1	0,0	0,6	0,0	0,1
PC02	NC	0,1	0,0	NC	0,5	0,1	NC	0,0	0,1
PC03	NC	0,0	NC	0,0	0,0	0,0	NC	0,0	0,0
PC04	NC	0,1	0,0	0,1	NC	0,0	NC	NC	0,0
PC05	NC	0,0	0,1	0,1	0,0	NC	NC	NC	0,0
PC06	NC	0,0	NC	NC	NC	NC	NC	NC	SM

Fonte: O autor.

NC: Não Coletado.

SM: Sem Média.

Valor Máximo Permitido de Nitrogênio Amoniacal (N-NH₄⁺) - 1,5 mg/L.

Tabela 48 – Concentração de Cálcio do domínio hidrogeológico cristalino.

CÁLCIO (Ca ⁺⁺) - mg/L									
Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA
PC01	168	78	51	NC	50	264	42	384	148
PC02	NC	128	253	NC	53	208	NC	368	202
PC03	NC	83	NC	192	440	472	NC	592	356
PC04	NC	13	6	5	NC	32	NC	NC	14
PC05	NC	3	2	5	2	NC	NC	NC	3
PC06	NC	206	NC	NC	NC	NC	NC	NC	SM

Fonte: O autor.

NC: Não Coletado.

SM: Sem Média.

Tabela 49 – Concentração de Ferro do domínio hidrogeológico cristalino.

FERRO (Fe ⁺⁺) - mg/L									
Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA
PC01	0,1	0,1	0,1	NC	0,2	< 0,1	0,6	0,1	0,2
PC02	NC	0,2	0,1	NC	0,2	< 0,1	NC	0,0	0,1
PC03	NC	0,2	NC	0,1	0,2	< 0,1	NC	0,0	0,1
PC04	NC	1,2	0,4	3,5	NC	< 0,1	NC	NC	1,7
PC05	NC	0,5	2,4	5,8	0,7	NC	NC	NC	2,3
PC06	NC	0,2	NC	NC	NC	NC	NC	NC	SM

Fonte: O autor.

< 0,1: Limite de Detecção.

Em negrito: Valores Acima do Permitido Pela Portaria N° 2914 do Ministério da Saúde.

NC: Não Coletado.

SM: Sem Média.

Valor Máximo Permitido de Ferro - 0,3 mg/L.

Tabela 50 – Concentração de Magnésio do domínio hidrogeológico cristalino.

MAGNÉSIO (Mg ⁺⁺) - mg/L									
Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA
PC01	262	303	328	NC	302	226	171	230	260
PC02	NC	250	181	NC	316	250	NC	67	213
PC03	NC	310	NC	247	550	576	NC	442	425
PC04	NC	11	6	3	NC	34	NC	NC	13
PC05	NC	3	2	5	3	NC	NC	NC	3
PC06	NC	244	NC	NC	NC	NC	NC	NC	SM

Fonte: O autor.

NC: Não Coletado.

SM: Sem Média.

Tabela 51 – Concentração de Sódio do domínio hidrogeológico cristalino.

SÓDIO (Na⁺) - mg/L									
Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA
PC01	246	492	568	NC	282	251	767	964	510
PC02	NC	632	592	NC	352	283	NC	1196	611
PC03	NC	731	NC	853	843	424	NC	2880	1146
PC04	NC	135	74	54	NC	174	NC	NC	109
PC05	NC	61	78	68	70	NC	NC	NC	69
PC06	NC	552	NC	NC	NC	NC	NC	NC	SM

Fonte: O autor.

Em negrito: Valores Acima do Permitido Pela Portaria N° 2914 do Ministério da Saúde.

NC: Não Coletado.

SM: Sem Média.

Valor Máximo Permitido de Sódio - 200 mg/L.

Tabela 52 – Concentração de Potássio do domínio hidrogeológico cristalino.

POTÁSSIO (K⁺) - mg/L									
Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA
PC01	17	22	32	NC	15	20	6	48	23
PC02	NC	63	58	NC	32	43	NC	97	59
PC03	NC	22	NC	44	32	34	NC	77	42
PC04	NC	40	36	14	NC	43	NC	NC	33
PC05	NC	3	5	8	5	NC	NC	NC	5
PC06	NC	12	NC	NC	NC	NC	NC	NC	SM

Fonte: O autor.

NC: Não Coletado.

SM: Sem Média.

Tabela 53 – Concentração de Bicarbonato do domínio hidrogeológico cristalino.

BICARBONATO (HCO₃⁻) - mg/L									
Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA
PC01	468	458	478	NC	458	463	429	488	463
PC02	NC	404	394	NC	355	380	NC	453	397
PC03	NC	335	NC	291	419	458	NC	493	399
PC04	NC	384	25	54	NC	89	NC	NC	138
PC05	NC	138	133	108	123	NC	NC	NC	126
PC06	NC	404	NC	NC	NC	NC	NC	NC	SM

Fonte: O autor.

NC: Não Coletado.

SM: Sem Média.

Tabela 54 – Concentração de Cloreto do domínio hidrogeológico cristalino.

CLORETO (Cl⁻) - mg/L									
Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA
PC01	1490	1470	1350	NC	1235	1040	2349	1394	1475
PC02	NC	2099	1819	NC	1769	1799	NC	2313	1960
PC03	NC	2169	NC	1679	4084	3969	NC	4852	3351
PC04	NC	1949	90	60	NC	600	NC	NC	675
PC05	NC	200	68	64	52	NC	NC	NC	96
PC06	NC	434	NC	NC	NC	NC	NC	NC	SM

Fonte: O autor.

Em negrito: Valores Acima do Permitido Pela Portaria N° 2914 do Ministério da Saúde.

Valor Máximo Permitido de Cloreto - 250 mg/L.

NC: Não Coletado.

SM: Sem Média.

Tabela 55 – Concentração de Fluoreto do domínio hidrogeológico cristalino.

FLUORETO (F⁻) - mg/L									
Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA
PC01	2,0	1,0	2,0	NC	2,0	1,0	2,0	2,0	1,7
PC02	NC	5,0	4,0	NC	4,0	3,0	NC	5,0	4,2
PC03	NC	4,0	NC	4,0	3,0	2,0	NC	3,0	3,2
PC04	NC	0,6	0,2	0,3	NC	0,9	NC	NC	0,5
PC05	NC	2,0	2,0	1,0	2,0	NC	NC	NC	1,8
PC06	NC	0,5	NC	NC	NC	NC	NC	NC	SM

Fonte: O autor.

Em negrito: Valores Acima do Permitido Pela Portaria N° 2914 do Ministério da Saúde.

NC: Não Coletado.

SM: Sem Média.

Valor Máximo Permitido de Fluoreto - 1,5 mg/L.

Tabela 56 – Concentração de Ortofosfato do domínio hidrogeológico cristalino.

ORTOFOSFATO (PO₄⁻) - mg/L									
Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA
PC01	0,0	0,0	0,0	NC	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
PC02	NC	0,0	0,0	NC	0,0	0,3	NC	0,1	0,1
PC03	NC	0,0	NC	1,1	0,0	0,0	NC	0,0	0,2
PC04	NC	0,0	0,0	0,0	NC	0,1	NC	NC	0,0
PC05	NC	0,0	0,0	0,0	0,0	NC	NC	NC	0,0
PC06	NC	0,0	NC	NC	NC	NC	NC	NC	SM

Fonte: O autor.

NC: Não Coletado.

SM: Sem Média.

Tabela 57 – Concentração de Nitrato do domínio hidrogeológico cristalino.

NITRATO (N-NO ₃ ⁻) - mg/L									
Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA
PC01	10,4	11,3	5,2	NC	7,0	11,7	10,2	11,8	9,7
PC02	NC	15,7	10,4	NC	6,5	13,6	NC	14,3	12,1
PC03	NC	14,7	NC	7,6	6,6	16,2	NC	13,5	11,7
PC04	NC	12,0	11,5	5,0	NC	10,3	NC	NC	9,7
PC05	NC	1,3	0,5	0,1	0,2	NC	NC	NC	0,5
PC06	NC	12,6	NC	NC	NC	NC	NC	NC	SM

Fonte: O autor.

< 0,1: Limite de Detecção.

Em negrito: Valores Acima do Permitido Pela Portaria N° 2914 do Ministério da Saúde.

NC: Não Coletado.

SM: Sem Média.

Valor Máximo Permitido de Nitrato (N-NO₃⁻) - 10 mg/L.

Tabela 58 – Concentração de Nitrito do domínio hidrogeológico cristalino.

NITRITO (N-NO ₂ ⁻) - mg/L									
Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA
PC01	0,38	0,25	0,20	NC	0,39	0,32	0,00	0,15	0,24
PC02	NC	0,94	1,33	NC	0,21	0,02	NC	0,04	0,51
PC03	NC	0,00	NC	0,00	< 0,02	0,01	NC	< 0,02	< 0,02
PC04	NC	0,41	0,38	0,15	NC	0,05	NC	NC	0,25
PC05	NC	< 0,02	0,02	0,15	< 0,02	NC	NC	NC	0,09
PC06	NC	1,28	NC	NC	NC	NC	NC	NC	SM

Fonte: O autor.

< 0,02: Limite de Detecção.

Em negrito: Valores Acima do Permitido Pela Portaria N° 2914 do Ministério da Saúde.

NC: Não Coletado.

SM: Sem Média.

Valor Máximo Permitido de Nitrito (N-NO₂⁻) - 1,0 mg/L.

Tabela 59 – Concentração de Sulfato do domínio hidrogeológico cristalino.

SULFATO (SO ₄ ⁻) - mg/L									
Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA
PC01	156	30	148	NC	133	161	184	203	145
PC02	NC	12	106	NC	76	112	NC	144	90
PC03	NC	9	NC	31	89	122	NC	107	72
PC04	NC	6	20	114	NC	7	NC	NC	37
PC05	NC	5	21	111	4	NC	NC	NC	35
PC06	NC	16	NC	NC	NC	NC	NC	NC	SM

Fonte: O autor.

NC: Não Coletado.

SM: Sem Média.

Valor Máximo Permitido de Sulfato - 250 mg/L.

Tabela 60 – Concentração de Sílica do domínio hidrogeológico cristalino.

SÍLICA (SiO₂) - mg/L									
Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA
PC01	28	24	26	NC	28	19	26	17	24
PC02	NC	23	34	NC	33	22	NC	15	25
PC03	NC	25	NC	38	39	14	NC	14	26
PC04	NC	20	12	21	NC	58	NC	NC	28
PC05	NC	30	48	52	44	NC	NC	NC	43
PC06	NC	19	NC	NC	NC	NC	NC	NC	SM

Fonte: O autor.

NC: Não Coletado.

SM: Sem Média.

Tabela 61 – Concentração de Alcalinidade Total do domínio hidrogeológico cristalino.

ALCALINIDADE TOTAL - mg/L									
Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA
PC01	384	376	392	NC	376	380	351	400,0	380
PC02	NC	331	323	NC	291	311	NC	371,7	326
PC03	NC	275	NC	238	343	376	NC	404,0	327
PC04	NC	315	20	44	NC	73	NC	NC	113
PC05	NC	113	109	89	101	NC	NC	NC	103
PC06	NC	331	NC	NC	NC	NC	NC	NC	SM

Fonte: O autor.

NC: Não Coletado.

SM: Sem Média.

Tabela 62 – Concentração de Dureza Total do domínio hidrogeológico cristalino.

DUREZA TOTAL - mg/L									
Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA
PC01	1512	1460	1496	NC	1384	1600	816	1920	1455
PC02	NC	1360	1388	NC	1448	1560	NC	1200	1391
PC03	NC	1500	NC	1508	3392	3580	NC	3320	2660
PC04	NC	76	40	24	NC	220	NC	NC	90
PC05	NC	20	16	32	20	NC	NC	NC	22
PC06	NC	1532	NC	NC	NC	NC	NC	NC	SM

Fonte: O autor.

Em negrito: Valores Acima do Permitido Pela Portaria N° 2914 do Ministério da Saúde.

NC: Não Coletado.

SM: Sem Média.

Valor Máximo Permitido de Dureza Total - 500 mg/L.

5.6.4 Qualidade das Águas do Domínio Hidrogeológico Cristalino para Consumo Humano e Irrigação

De acordo com Richter e Kreitler (1993), todas as águas naturais contêm alguns minerais dissolvidos pela interação com a atmosfera e gases do solo, mistura com outras soluções, e interações com a biosfera e litosfera. Em muitos casos, estes processos resultam em águas naturais contendo concentrações de STD acima da recomendada para água potável. Esta deterioração da qualidade da água é aumentada por quase todas as atividades humanas.

A salinização, isto é, aumento na concentração de sais (ou seja, aumentando também o STD), é a forma mais conhecida de contaminação da água (Quadro 05). O efeito da salinização é um aumento na concentração específica de constituintes químicos, como também na concentração total. A Tabela 63 mostra os resultados de STD para as águas do domínio hidrogeológico cristalino.

Quadro 05 – Classificação para água subterrânea, com base na concentração (mg/L) de STD.

CLASSIFICAÇÃO	STD em mg/L
ÁGUA DOCE	< 1000
ÁGUA SALOBRA	1000 - 10000
ÁGUA SALGADA	10000 - 100000
SALMOURA	> 100000

Fonte: Freeze and Cherry (1979) *apud* Richter e Kreitler (1993).

Tabela 63 – Concentração de STD médio das águas do domínio hidrogeológico cristalino.

Amostras	STD (mg/L)	Classificação
PC01	3141	Água Salobra
PC02	3687	Água Salobra
PC03	5866	Água Salobra
PC04	758	Água Doce
PC05	306	Água Doce
PC06	4011	Água Salobra

Fonte: O autor.

Adequação para Consumo Humano

De acordo com a Tabela 64, somente sulfato e nitrogênio amoniacal estão com todas as amostras dentro da faixa de potabilidade aceitável. As concentrações em sais dissolvidos na água (STD) são excessivas em 73 % das amostras, tornando a água imprópria para o consumo humano. Próximo aos poços PC01, PC02, PC03, e PC06 é desenvolvida a pecuária, e segundo Logan (1967), de uma maneira geral, o gado deve consumir água com menos de 5.000 mg.L⁻¹ de sais dissolvidos (STD), valor este ultrapassado apenas pelo poço PC03.

A concentração do íon sódio é de interesse, já que o alto consumo deste íon através da água e refeições salgadas tem conduzido ao aumento da pressão arterial da população, o que pode resultar em doenças cardiovasculares (BAIRD, 2002. p. 473). De acordo com a Portaria N° 2914/2011 do Ministério da Saúde, o valor máximo permitido é 200 mg L⁻¹ do íon sódio, e 69 % das amostras (PC01, PC02, PC03, e PC06) excederam o limite.

Tabela 64 – Potabilidade das águas do domínio hidrogeológico cristalino (de acordo com Portaria nº 2914 do Ministério da Saúde).

PARÂMETRO	DOMÍNIO HIDROGEOLÓGICO CRISTALINO	
	QUANT.	%
Na⁺		
* < 200	08	31
> 200	18	69
F⁻		
* < 1,5	08	31
> 1,5	18	69
Fe		
* < 0,3	18	69
> 0,3	08	31
Cl⁻		
* < 250	06	23
> 250	20	77
SO₄⁻		
* < 250	26	100
> 250		
NO₃⁻		
* < 10	10	38
> 10	16	62
NO₂⁻		
* < 1,0	24	92
> 1,0	02	08
NH₄⁺		
* < 1,5	26	100
> 1,5		
DUREZA TOTAL		
* < 500	08	31
> 500	18	69
STD		
* < 1000	07	27
> 1000	19	73
pH		
* 6,0 - 9,5	25	96
< 6,0 e > 9,5	01	04

Fonte: O autor.

*= Padrão de aceitação para consumo humano de acordo com a portaria nº 2914/2011 – Ministério da Saúde.

Quant. = número de amostras por categoria.

(%) = percentual de amostras por categoria.

Os elevados teores em nitrato (62 % das amostras), N-NO₃⁻ em mg.L⁻¹, evidenciam águas poluídas. De acordo com Santos (1997), águas subterrâneas com teores acima de 05 mg.L⁻¹ podem ser indicativos de contaminação por atividade humana (esgotos, fossas, adubos nitrogenados, resíduos de animais etc).

Segundo Baird (2011), em estômago com pH superior a 5 (geralmente de criança), pode haver uma proliferação de bactérias capazes de reduzir nitrato a nitrito. Estes nitritos podem agir sobre a hemoglobina e a transformar em meta-hemoglobina, incapaz de se

transformar em oxihemoglobina e de assegurar o transporte de oxigênio aos tecidos, além disso, os nitritos podem reagir com certas aminas para produzir N-nitrossaminas, substâncias essas de ação carcinogênica comprovada em animais.

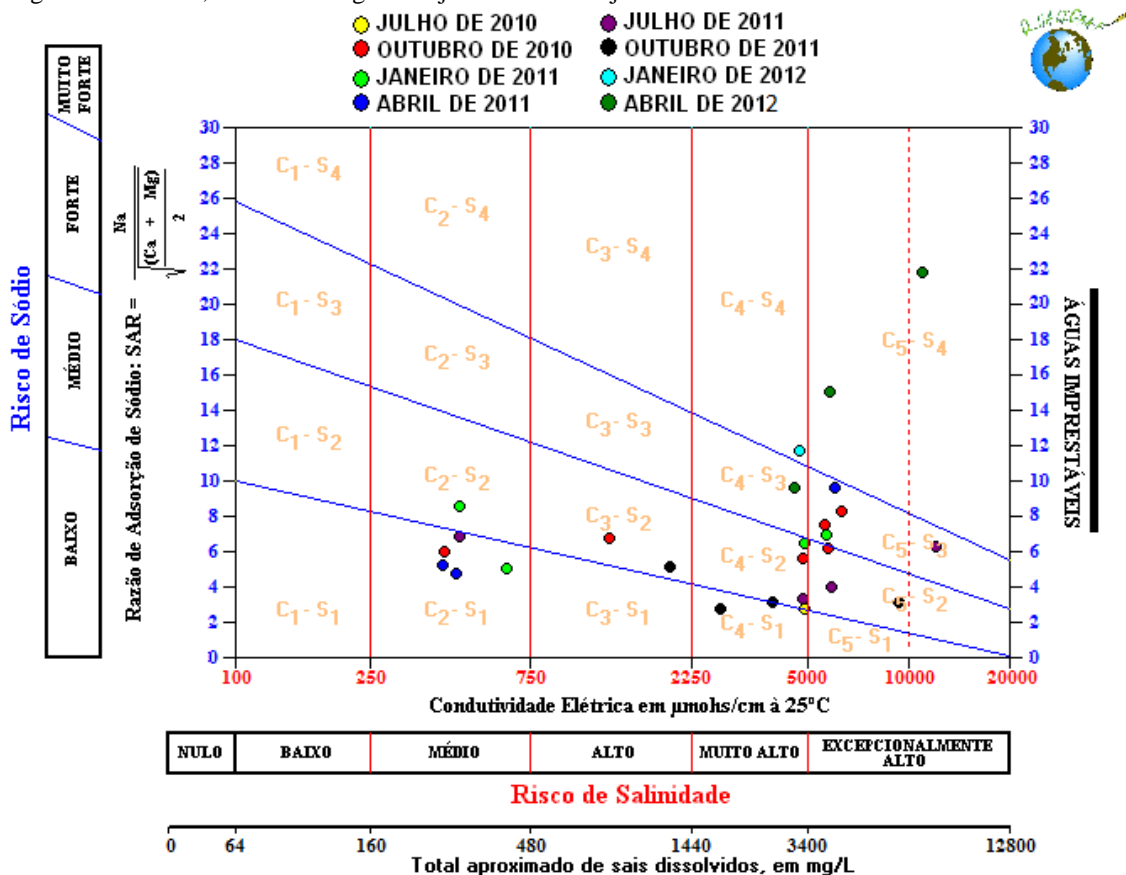
Nas zonas rurais, uma das principais fontes de contaminação das águas é a agropecuária, através da prática de adubagem intensiva com compostos nitrogenados e resíduos animais. Os poços do domínio hidrogeológico cristalino se situam em áreas de plantação para subsistência, onde pouco se usa fertilizante, todavia próximos de currais e bebedouro para animais, onde a pecuária é intensa. Portanto, pode-se dizer, que a contaminação por nitrato, desses poços, provavelmente está relacionada a resíduos animais, os quais são ricos em nitrogênio, que se decompõe em nitrato na presença de oxigênio, e de acordo com Lopes *et al.* (2008), esta contaminação é facilmente disseminada através das fissuras das rochas nas épocas de chuva.

Adequação Para Irrigação

Em termos químicos, as águas subterrâneas dos terrenos cristalinos da Região Nordeste encravadas na região do Polígono das Secas, apresentam, de uma maneira geral, uma grande predominância de Cloreto, que é o íon predominante em mais de 93 % das amostras. Foi observado que entre as amostras classificadas como C4-S1, C4-S2, C4-S3, C4-S4, C5-S2, C5-S3, C5-S4, C6-S2, C6-S3 e C6-S4 as águas cloretadas (sódicas, mistas e cálcicas) são as dominantes e correspondem a 90 % do total, enquanto que as Bicarbonatadas e Sulfatadas somam pouco mais que 4 %, cada (LIMA *et al.*, 2009, p. 11).

As águas dos poços no domínio hidrogeológico cristalino apresentam condutividade elétrica entre 411 e 11.940 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, o que confere a água uma salinidade excessiva em muitos poços, portanto, danosa ou imprópria para a maioria das culturas. Os poços PC01, PC02, PC03 e PC06 (74 % das amostras) pertencem às categorias que são consideradas águas com risco de salinidade alta, muito alta e excepcionalmente alta (Tabela 65), ou seja, águas que podem ter efeitos nocivos sobre culturas sensíveis, ou, águas que podem ter efeitos nocivos e requerem uma prática de irrigação controlada, ou ainda, águas que podem ser utilizadas apenas em plantas tolerantes, sobre solos permeáveis e usando uma prática de irrigação controlada (Figura 22).

Figura 22 – Classificação das águas do domínio hidrogeológico cristalino para fins de irrigação, segundo o diagrama do USSL, com amostragens de julho de 2010 a janeiro de 2012.



Fonte: O autor.

Tabela 65 – Classes de água para fins de irrigação do domínio hidrogeológico cristalino durante todas as etapas de campo (julho/2010 a abril/2012).

CLASSE	NÚMERO DE AMOSTRAS	%
C ₂ - S ₁	05	19,2
C ₄ - S ₁	03	11,6
C ₂ - S ₂	01	03,8
C ₃ - S ₂	02	07,7
C ₄ - S ₂	03	11,6
C ₅ - S ₂	03	11,6
C ₄ - S ₃	01	03,8
C ₄ - S ₄	01	03,8
C ₅ - S ₃	05	19,2
C ₅ - S ₄	02	07,7
TOTAL	26	100

Fonte: O autor.

5.7 Hidroquímica dos Aquíferos Aluvionares

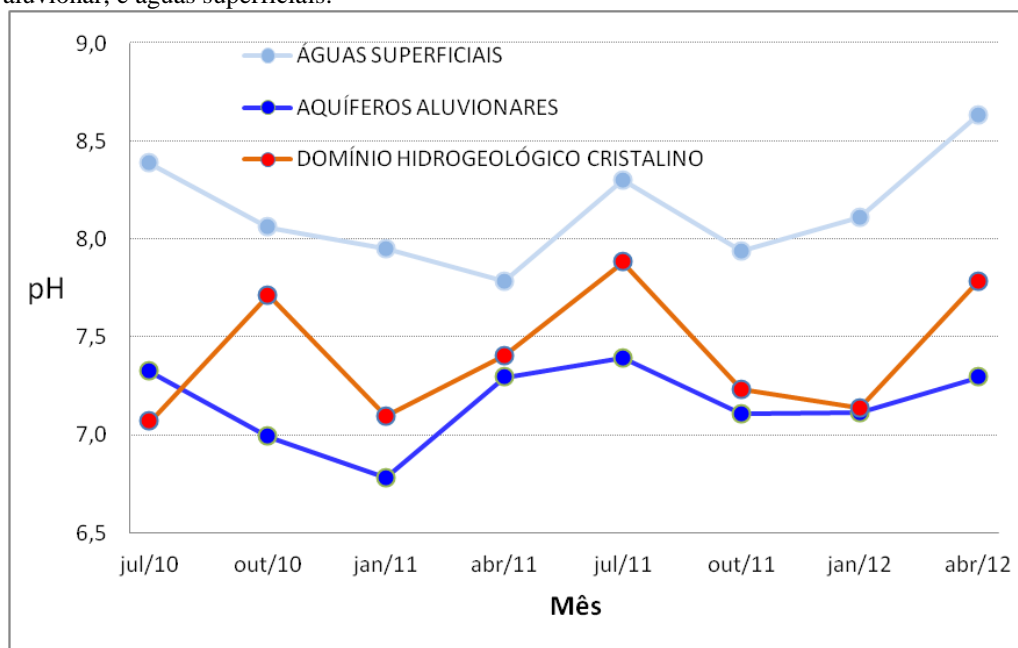
A composição química da água pode resultar não apenas das interações água/rocha que ocorrem naturalmente nas zonas insaturada e saturada, como os processos de precipitação, dissolução e adsorção/dessorção, que liberam ou imobilizam o soluto, bem como, das condições climáticas que podem ocasionar variações sazonais na qualidade da água, sobretudo em aquíferos sedimentares onde a água se encontra a pequena profundidade. Mas, também, das infiltrações a partir de vazamento de tubulações de esgoto, lixões e aterros sanitários, problemas construtivos, superexploração de aquíferos costeiros com conseqüente intrusão marinha etc.

5.7.1 pH

O pH médio das águas dos aquíferos aluvionares é $7,1 \pm 0,2$, caracterizando águas de pH neutro. As águas dos aquíferos aluvionares apresentaram pH entre 6,8 e 7,4 (médias mensais), abaixo do pH médio mensal das águas superficiais (Gráfico 12). Isto ocorre porque o CO₂ do solos (aluviões) é consumido aumentando o pH da água do rio. O menor e o maior valor foram observados respectivamente em janeiro de 2011 no ponto (PA03), com o valor de 6,3 e em julho de 2011 no ponto (PA01) com o valor de 7,9 (Tabela 66).

Nota-se que em abril de 2011 o pH das águas superficiais decaiu notoriamente, isto se deve ao grande volume de chuva ocorrido neste período, fazendo com que o pH das águas do rio se torne ácido rapidamente, o que não ocorre nas águas subterrâneas, pois a água levará um tempo para se misturar.

Gráfico 12 – Comparação das médias mensais dos valores de pH para os domínio hidrogeológicos cristalino e aluvionar, e águas superficiais.



Fonte: O autor.

Tabela 66 - pH das águas dos aquíferos aluvionares no período de coleta.

Amostras	Jul/10	Out/10	Jan/11	Abr/11	Jul/11	Out/11	Jan/12	Abr/12	MÉDIA pH	DESVIO PADRÃO
PA01	7,4	7,2	7,0	NC	7,9	7,3	7,4	7,4	7,4	0,3
PA02	7,3	7,3	7,1	NC	NC	7,2	7,3	NC	7,2	0,1
PA03	NC	6,6	6,3	7,3	7,1	6,9	6,9	NC	6,9	0,4
PA04	NC	6,9	6,7	7,3	7,2	7,0	6,8	7,21	7,0	0,2
MÉDIA MENSAL	7,3	7,0	6,8	7,3	7,4	7,1	7,1	7,3	7,1	0,2

Fonte: O autor.

5.7.2 Condutividade Elétrica

A CE média a 25 °C das águas dos aquíferos aluvionares foi $1.180 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (Tabela 67), superior à CE média das águas superficiais ($439 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) e inferior à média das águas do domínio hidrogeológico cristalino. O poço PA03 capta água (média) com CE superior à média dos aquíferos aluvionares, podendo chegar a CE máxima de $6.320 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ em janeiro de 2011, enquanto os demais poços captam águas (média) menos salobras em toda época do ano, podendo chegar à condutividade mínima nos aluviões de $376 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (PA01); estes poços, apresentam águas com salinidade maiores que as médias das águas superficiais.

Estes resultados refletem o padrão esperado para os aquíferos rasos do Nordeste do Brasil e dos rios em contato com os mesmos.

Tabela 67 – Condutividade elétrica em $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ das águas dos aquíferos aluvionares.

Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA CE
PA01	478	522	645	NC	668	376	399	517	515
PA02	1073	864	840	NC	NC	816	1147	NC	948
PA03	NC	2190	6320	822	906	2140	3600	NC	2663
PA04	NC	728	866	506	463	533	562	504	595
MÉDIA MENSAL	776	1076	2168	664	679	966	1427	511	1180

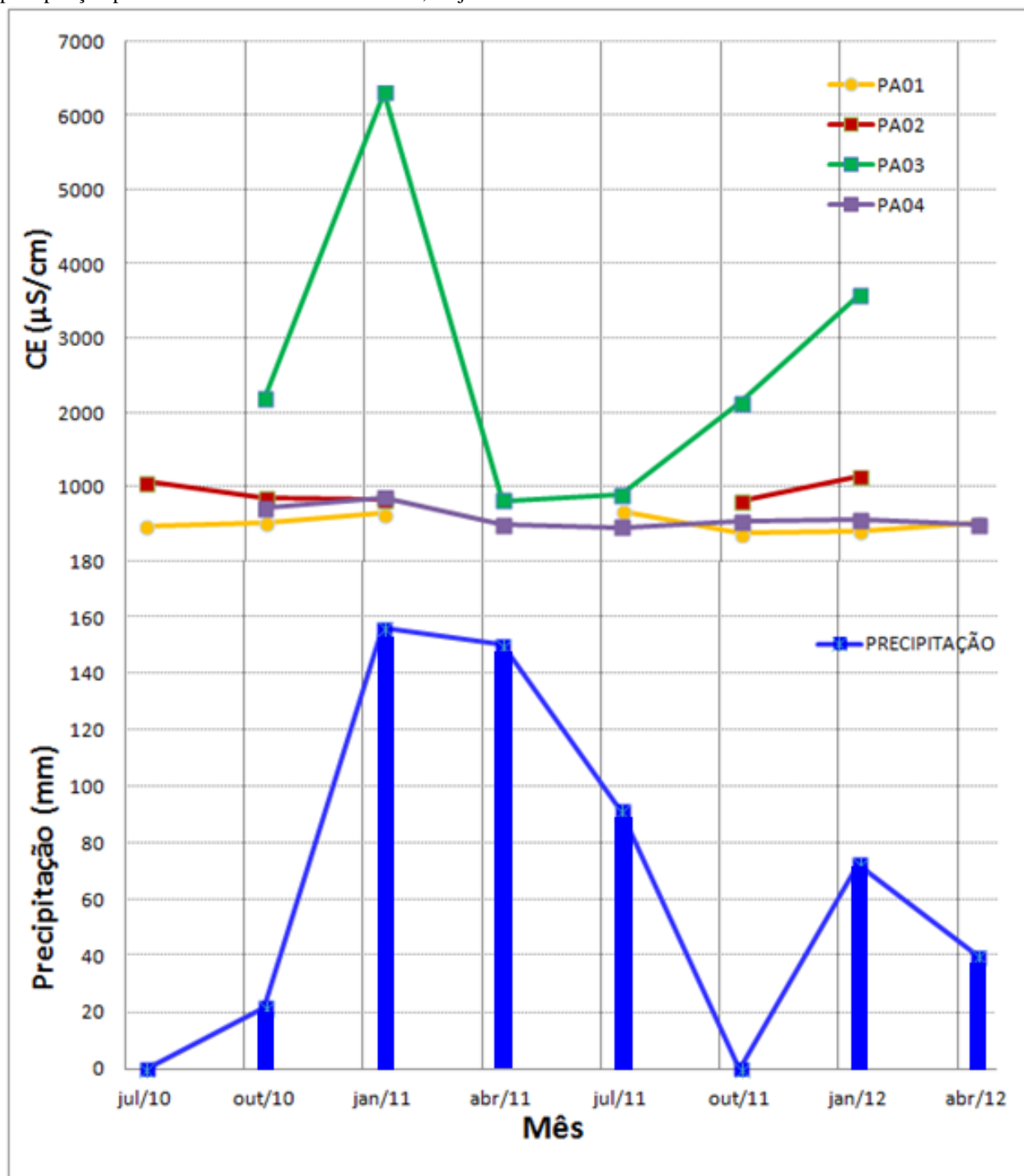
Fonte: O autor.

NC: Não Coletado.

O ponto PA03 apresenta valores que não são normais (padrões) para aluviões, talvez por este se apresentar inserido num baixio, onde, hipoteticamente, os sais são lixiviados e transportados para o seu entorno ou, o poço capta águas do sistema cristalino no qual a água percola nas fraturas que condicionam a morfologia do rio.

Observou-se que a CE variou com o tempo (Gráfico 13) e que existe um aumento na concentração de sais nos poços PA01, PA02 e PA04 no início do período chuvoso (janeiro de 2011 e janeiro de 2012). No entanto, ocorrem fracas oscilações na CE sem uma nítida correlação com a pluviometria da área, o que pode ser decorrente do pequeno percentual de chuva infiltrada ou das condições hidrogeológicas do meio. Apenas o PA04 apresenta boa relação com a pluviometria e assim pode-se supor que em alguns locais a recarga direta é rápida.

Gráfico 13 – Comparação entre as médias mensais dos valores de CE para os poços dos aquíferos aluvionares e a precipitação pluviométrica nos meses estudados, de julho de 2010 a abril de 2012.



Fonte: O autor.

O mapa da distribuição espacial da CE (Figura 23) foi construído a partir dos valores médios temporais das águas subterrâneas e superficiais.

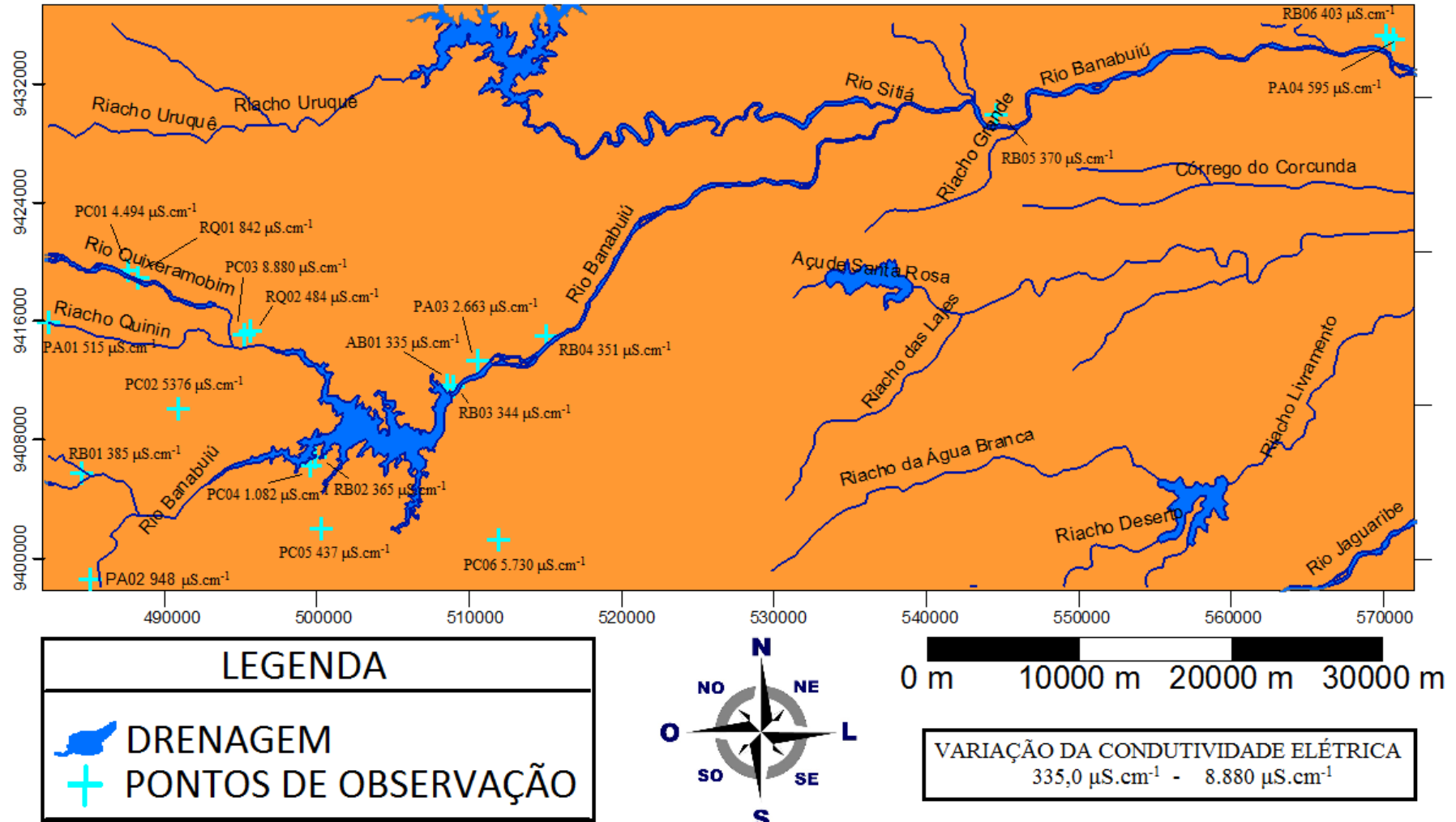
O poço (PA04) deste estudo coincide com o poço PA05 estudado por Moura (2008), estes dados encontram-se no Quadro 06. Verificou-se uma leve diminuição na média da CE deste poço, isto pode ter ocorrido devido variações hidroquímicas naturais, pois, o valor de $671 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ passou apenas para $595 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, e ainda, esta pequena oscilação encontra-se dentro da faixa de desvio padrão, o que significa que estes valores de condutividade elétrica se mantêm sem alterações pontualmente.

Quadro 06 – Condutividade elétrica em $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ das águas dos aquíferos aluvionares do estudo realizado por Moura (2008).

Amostras	mar/06	jul/06	out/06	fev/07	mai/07	set/07	dez/07	mar/08	Média CE	Desvio Padrão
PA05 = PA04	798	752	559	837	625	643	561	594	671	109

Fonte: Moura (2008).

Figura 23 – Distribuição espacial da condutividade elétrica ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) das águas dos poços dos aluviões e do domínio hidrogeológico cristalino, rios Quixeramobim e Banabuiú, e açude Banabuiú.



Fonte: O autor.

5.7.3 Classificação das Águas dos Aquíferos Aluvionares pelos Íons Dominantes

As águas dos aquíferos aluvionares são distribuídas entre 03 tipos de água, são elas: cloretadas sódicas (48 %), cloretadas cálcio-magnesianas (26 %) e bicarbonatadas cálcio-magnesianas (26 %). Estas águas são hidroquimicamente similares as dos rios Quixeramobim e Banabuiú, hipoteticamente devido à conexão hidráulica entre aquífero aluvionar e rio, como visto nos diagramas de *Piper* das Figuras 24 e 25.

Figura 24 – Diagrama de *Piper* para as águas dos aquíferos aluvionares, com amostragens de julho de 2010 a janeiro de 2012.

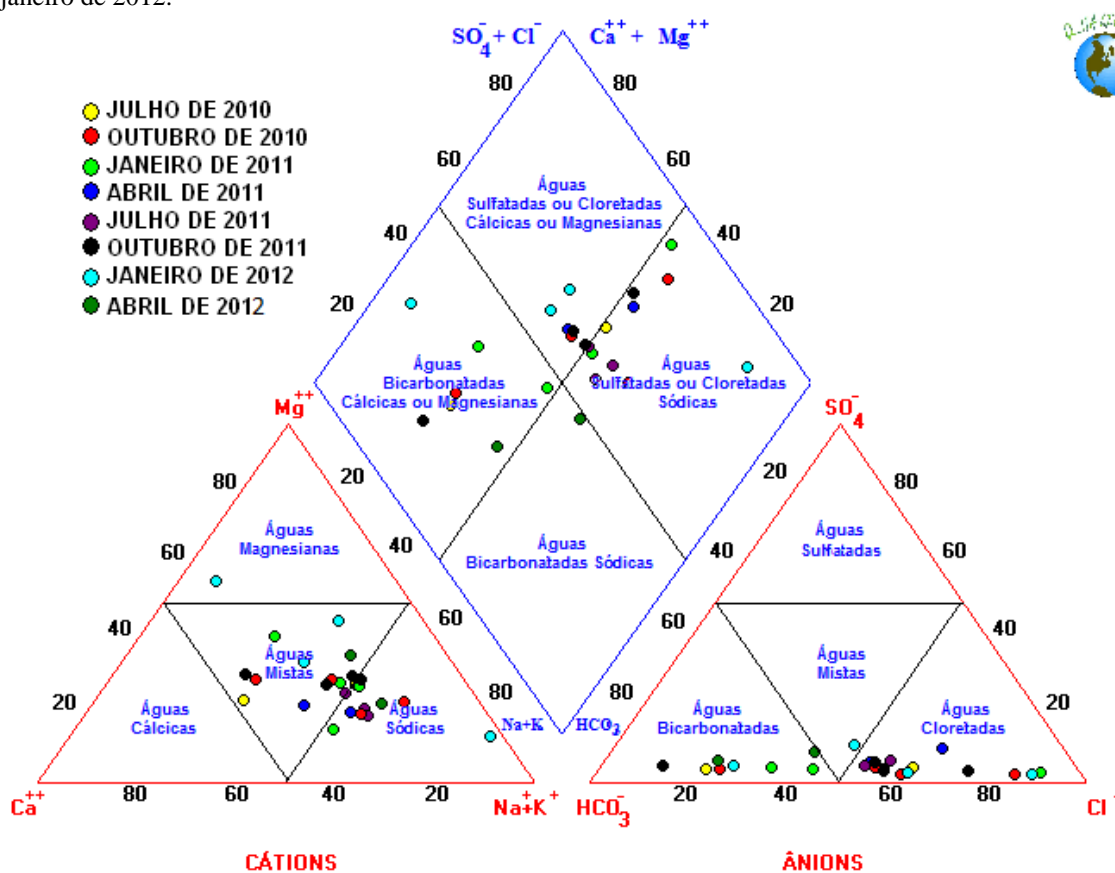
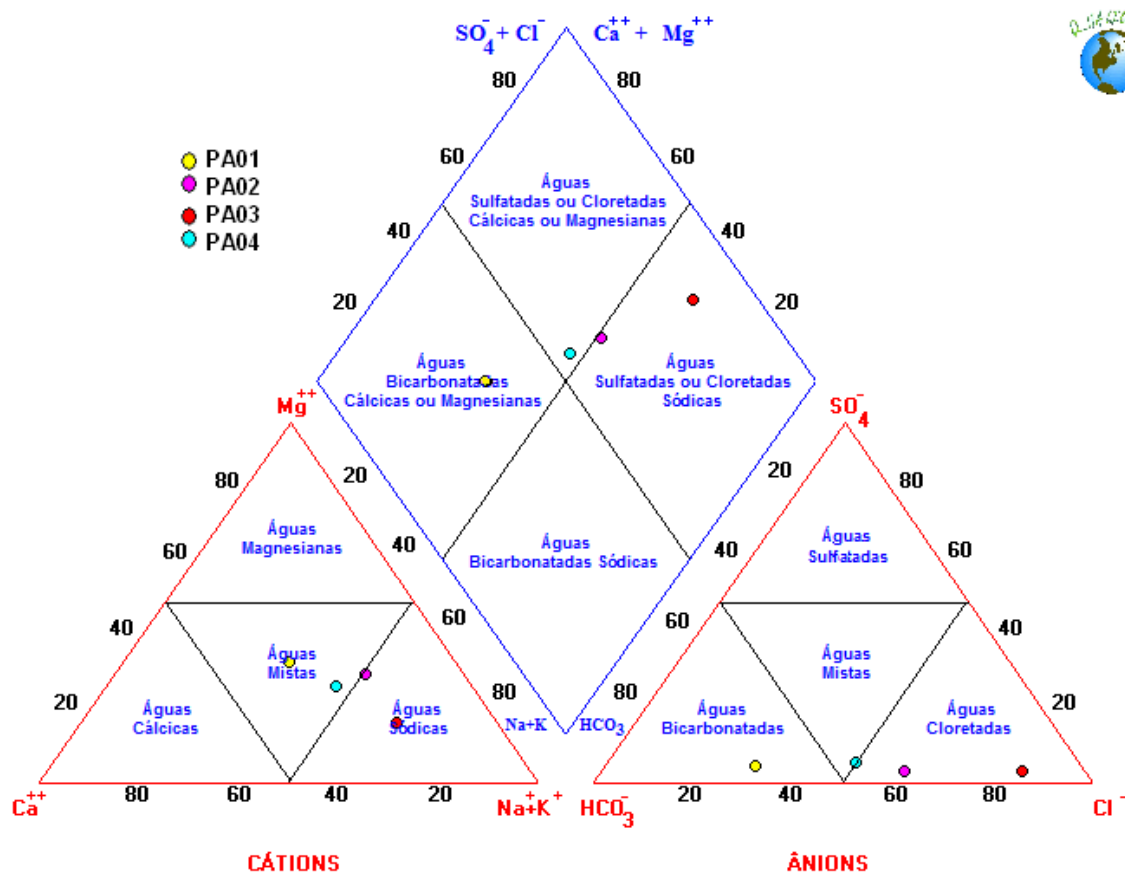


Figura 25 – Diagrama de Piper para as águas dos aquíferos aluvionares, com a média de todas as amostragens.



Fonte: O autor.

De modo geral, observa-se que quanto aos ânions, a água dos aquíferos aluvionares apresenta concentrações de cloreto maiores que os bicarbonatos, não havendo, um tipo bem definido.

O equilíbrio nos valores das concentrações dos cátions (valor médio) resultou no equilíbrio dos tipos sódico e cálcio-magnesiano das águas dos aquíferos aluvionares. A distribuição dos cátions, por abundância de maior a menor, é mostrada nas seguintes relações na Tabela 68.

Tabela 68 – Relações de abundância dos cátions das águas dos aquíferos aluvionares.

AMOSTRAS	RELAÇÃO DOS CÁTIONS
PA01	Na+K = Ca > Mg
PA02	Na+K > Mg > Ca
PA03	Na+K > Ca > Mg
PA04	Na+K > Ca > Mg

Fonte: O autor.

O ânion dominante nas águas dos aquíferos aluvionares foi o cloreto, com concentração média de 359 mg.L^{-1} . A concentração média dos ânions para estas águas resulta na relação expressa na Tabela 69.

Tabela 69 – Relações de abundância dos ânions das águas dos aquíferos aluvionares.

AMOSTRAS	RELAÇÃO DOS ÂNIONS
PA01	$\text{HCO}_3 + \text{CO}_3 > \text{Cl} > \text{SO}_4$
PA02	$\text{Cl} > \text{HCO}_3 + \text{CO}_3 > \text{SO}_4$
PA03	$\text{Cl} > \text{HCO}_3 + \text{CO}_3 > \text{SO}_4$
PA04	$\text{Cl} > \text{HCO}_3 + \text{CO}_3 > \text{SO}_4$

Fonte: O autor.

Gomes (2005) apresentou uma concentração média de sílica no aquífero aluvionar de 26 mg/L , com variação temporal em alguns poços. Resultado maior que o encontrado neste estudo, o qual obteve uma concentração média de sílica nos aquíferos aluvionares de 20 mg/L . No domínio hidrogeológico cristalino, a concentração média de sílica foi de 29 mg/L e nos rios 11 mg/L . Essas variações foram devidas a utilização por microrganismos, mineralização da matéria orgânica, precipitação etc.

O intemperismo de minerais de argila e os feldspatos constituem as principais fontes de sílica para as águas subterrâneas. Outra importante fonte de liberação de silício é o quartzo (SiO_2), que é um dos mais resistentes minerais ao ataque físico-químico (Feitosa *et al.*, 2008, p. 336).

As Tabelas 70 a 86 mostram os parâmetros físico-químicos das amostras de águas dos aquíferos aluvionares no período de estudo. Os dados para a confecção dos diagramas de Piper foram utilizados a partir destas tabelas, e estas serviram de embasamento para as discussões a seguir sobre adequações da água para consumo humano e irrigação.

Tabela 70 – Concentração de Nitrogênio Amoniacal dos aquíferos aluvionares.

NITROGÊNIO AMONICAL (N-NH ₄ ⁺) - mg/L									
Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA
PA01	0,1	0,0	0,0	NC	0,0	3,0	30,7	0,0	4,8
PA02	0,2	0,0	0,0	NC	NC	0,0	2,7	NC	0,6
PA03	NC	0,2	0,1	1,1	0,4	0,0	4,4	NC	1,0
PA04	NC	0,2	0,1	0,9	0,4	0,0	17,1	0,1	2,7

Fonte: O autor.

Em negrito: Valores Acima do Permitido Pela Portaria N° 2914 do Ministério da Saúde.

NC: Não Coletado.

Tabela 71 – Concentração de Cálcio dos aquíferos aluvionares.

CÁLCIO (Ca ⁺⁺) - mg/L									
Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA
PA01	45	43	43	NC	27	26	30	26	34
PA02	40	30	34	NC	NC	34	32	NC	34
PA03	NC	128	352	38	42	64	22	NC	108
PA04	NC	37	42	37	22	27	27	21	30

Fonte: O autor.

NC: Não Coletado.

Tabela 72 – Concentração de Ferro dos aquíferos aluvionares.

FERRO (Fe ⁺⁺) - mg/L									
Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA
PA01	0,3	1,5	1,0	NC	3,1	1,7	1,7	3,5	1,8
PA02	3,2	0,1	0,4	NC	NC	0,7	2,6	NC	1,4
PA03	NC	3,4	3,4	3,5	3,6	1,5	3,8	NC	3,2
PA04	NC	3,5	3,3	3,4	3,2	1,9	4,1	3,6	3,3

Fonte: O autor.

< 0,1: Limite de Detecção.

Em negrito: Valores Acima do Permitido Pela Portaria N° 2914 do Ministério da Saúde.

NC: Não Coletado.

Valor Máximo Permitido de Ferro - 0,3 mg/L.

Tabela 73 – Concentração de Magnésio dos aquíferos aluvionares.

MAGNÉSIO (Mg ⁺⁺) - mg/L									
Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA
PA01	12	17	33	NC	13	11	29	28	20
PA02	29	26	24	NC	NC	27	52	NC	31
PA03	NC	56	86	15	18	53	72	NC	50
PA04	NC	23	27	12	12	15	18	13	17

Fonte: O autor.

NC: Não Coletado.

Tabela 74 – Concentração de Sódio dos aquíferos aluvionares.

SÓDIO (Na ⁺) - mg/L									
Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA
PA01	31	31	39	NC	70	14	06	61	36
PA02	105	145	89	NC	NC	84	80	NC	100
PA03	NC	324	616	82	109	180	1018	NC	388
PA04	NC	59	72	47	46	46	35	65	53

Fonte: O autor.

Em negrito: Valores Acima do Permitido Pela Portaria N° 2914 do Ministério da Saúde.

NC: Não Coletado.

Valor Máximo Permitido de Sódio - 200 mg/L.

Tabela 75 – Concentração de Potássio dos aquíferos aluvionares.

POTÁSSIO (K ⁺) - mg/L									
Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA
PA01	03	05	06	NC	05	07	02	13	06
PA02	<LD	03	02	NC	NC	04	06	NC	03
PA03	NC	12	27	06	08	07	06	NC	11
PA04	NC	20	30	06	06	06	06	10	12

Fonte: O autor.

NC: Não Coletado.

<LD: Menor que o limite de detecção.

Tabela 76 – Concentração de Bicarbonato dos aquíferos aluvionares.

BICARBONATO (HCO ₃ ⁻) - mg/L									
Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA
PA01	207	251	246	NC	168	168	163	222	203
PA02	217	202	187	NC	NC	187	227	NC	204
PA03	NC	212	311	123	202	271	483	NC	267
PA04	NC	182	281	133	99	113	143	168	160

Fonte: O autor.

NC: Não Coletado.

Tabela 77 – Concentração de Cloreto dos aquíferos aluvionares.

CLORETO (Cl ⁻) - mg/L									
Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA
PA01	34	48	80	NC	122	14	36	40	53
PA02	244	200	160	NC	NC	160	238	NC	200
PA03	NC	800	2159	196	184	530	2599	NC	1078
PA04	NC	144	132	102	84	90	96	78	104

Fonte: O autor.

Em negrito: Valores Acima do Permitido Pela Portaria N° 2914 do Ministério da Saúde.

NC: Não Coletado.

Valor Máximo Permitido de Cloreto - 250 mg/L.

Tabela 78 – Concentração de Fluoreto dos aquíferos aluvionares.

FLUORETO (F⁻) - mg/L									
Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA
PA01	0,4	0,4	0,3	NC	0,2	0,3	0,4	1,0	0,4
PA02	0,4	0,5	0,5	NC	NC	0,3	0,5	NC	0,4
PA03	NC	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,4	NC	0,3
PA04	NC	0,4	0,4	0,2	0,2	0,2	0,3	0,7	0,3

Fonte: O autor.

NC: Não Coletado.

Valor Máximo Permitido de Fluoreto - 1,5 mg/L.

Tabela 79 – Concentração de Ortofosfato dos aquíferos aluvionares.

ORTOFOSFATO (PO₄⁻) - mg/L									
Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA
PA01	0,0	0,0	0,0	NC	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
PA02	1,1	1,1	1,1	NC	NC	0,0	0,3	NC	0,7
PA03	NC	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	NC	0,1
PA04	NC	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	0,0	0,1

Fonte: O autor.

NC: Não Coletado.

Tabela 80 – Concentração de Nitrato dos aquíferos aluvionares.

NITRATO (N-NO₃⁻) - mg/L									
Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA
PA01	0,9	1,1	0,3	NC	< 0,1	< 0,1	1,0	1,0	0,8
PA02	0,5	0,5	< 0,1	NC	NC	0,3	1,8	NC	0,8
PA03	NC	3,3	< 0,1	0,4	0,1	0,4	0,2	NC	0,9
PA04	NC	0,6	0,1	< 0,1	< 0,1	0,1	< 0,1	0,2	0,3

Fonte: O autor.

< 0,1: Limite de Detecção.

NC: Não Coletado.

Valor Máximo Permitido de Nitrato (N-NO₃⁻) - 10 mg/L.

Tabela 81 – Concentração de Nitrito dos aquíferos aluvionares.

NITRITO (N-NO₂⁻) - mg/L									
Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA
PA01	< 0,02	0,01	< 0,02	NC	< 0,02	< 0,02	0,02	< 0,02	< 0,02
PA02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	NC	NC	< 0,02	0,00	NC	< 0,02
PA03	NC	< 0,02	0,03	0,91	0,00	0,02	0,05	NC	0,20
PA04	NC	< 0,02	0,01	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,02	< 0,02	0,02

Fonte: O autor.

< 0,02: Limite de Detecção.

NC: Não Coletado.

Valor Máximo Permitido de Nitrito (N-NO₂⁻) - 1,0 mg/L.

Tabela 82 – Concentração de Sulfato dos aquíferos aluvionares.

SULFATO (SO ₄) - mg/L									
Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA
PA01	04	05	07	NC	09	05	06	11	07
PA02	13	02	05	NC	NC	05	04	NC	06
PA03	NC	05	40	32	18	16	26	NC	23
PA04	NC	08	09	10	04	09	24	18	12

Fonte: O autor.

NC: Não Coletado.

Valor Máximo Permitido de Sulfato - 250 mg/L.

Tabela 83 – Concentração de Sílica dos aquíferos aluvionares.

SÍLICA (SiO ₂) - mg/L									
Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA
PA01	25	18	23	NC	9	18	17	11	17
PA02	24	14	21	NC	NC	14	16	NC	18
PA03	NC	21	42	27	25	27	25	NC	28
PA04	NC	13	23	20	18	12	18	7	16

Fonte: O autor.

NC: Não Coletado.

Tabela 84 – Concentração de Alcalinidade Total dos aquíferos aluvionares.

ALCALINIDADE TOTAL - mg/L									
Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA
PA01	170	206	202	NC	137	137	133	182	167
PA02	178	166	154	NC	NC	154	186	NC	167
PA03	NC	174	255	101	166	222	396	NC	219
PA04	NC	149	230	109	81	93	117	137	131

Fonte: O autor.

NC: Não Coletado.

Tabela 85 – Concentração de Dureza Total dos aquíferos aluvionares.

DUREZA TOTAL - mg/L									
Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA
PA01	164	180	244	NC	124	108	196	180	171
PA02	220	184	184	NC	NC	196	296	NC	216
PA03	NC	552	1240	160	180	380	356	NC	478
PA04	NC	188	216	144	108	132	144	108	149

Fonte: O autor.

Em negrito: Valores Acima do Permitido Pela Portaria N° 2914 do Ministério da Saúde.

NC: Não Coletado.

Valor Máximo Permitido de Dureza Total - 500 mg/L.

Tabela 86 – Concentração de Dureza Total dos aquíferos aluvionares.

FLUORETO - mg/L									
Amostras	jul/10	out/10	jan/11	abr/11	jul/11	out/11	jan/12	abr/12	MÉDIA
PA01	0,4	0,4	0,3	NC	0,2	0,3	0,4	1,0	0,4
PA02	0,4	0,5	0,5	NC	NC	0,3	0,5	NC	0,4
PA03	NC	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,4	NC	0,3
PA04	NC	0,4	0,4	0,2	0,2	0,2	0,3	0,7	0,3

Fonte: O autor.

NC: Não Coletado.

5.7.4 Qualidade das Águas dos Aquíferos Aluvionares para Consumo Humano e Irrigação

Adequação para Consumo Humano

Segundo Foster e Hirata (1998), a contaminação das águas superficiais constitui-se num problema visível, mais propriamente identificável pela mudança da cor da água, cheiro, animais mortos, já a contaminação dos aquíferos é invisível, só podendo ser identificada por meio dos seus efeitos na saúde pública. Aliado a esta invisibilidade da percepção da poluição nos aquíferos, observa-se que há desinformação sobre o assunto e complacência sobre seus riscos.

Conforme o resultado das análises químicas observa-se na Tabela 87 que a maioria das amostras analisadas (84 %) apresenta concentração de sólidos totais dissolvidos (STD) inferior ao limite máximo permitido pela portaria nº 2914. Em relação ao pH, sódio, flúor, cloreto, nitrato, nitrito, nitrogênio amoniacal, dureza total e sulfato, acima de 80 % das amostras apresentam concentrações dentro do limite de potabilidade, portanto, a água dos aquíferos aluvionares, quanto a estes parâmetros, pode ser usada para indústria, irrigação, consumos humano e animal. O fator que reduziu esta porcentagem foi o ponto de amostragem PA03, pois se encontrou fora dos padrões durante quase todo o período de estudo.

As águas com valores de dureza no limite excessivo (Tabela 87) são águas incrustantes e que causam grande consumo de sabão, além de dificultar o cozimento de alimentos.

A maioria das amostras (96 %) dos aquíferos aluvionares apresentou concentrações de ferro total acima do valor aceitável, portanto, praticamente em toda área dos aluviões a água não é adequada para consumo humano sem passar por um prévio tratamento para remoção do ferro.

O ferro contido nas águas geralmente não constitui um perigo a saúde humana, mas causa problemas de natureza estética e organoléptica. Efetivamente, o ferro produz cor na água, causando mancha nas roupas, cerâmicas e louças sanitárias, forma incrustações na tubulação e colmatação dos filtros e pré-filtros, causando uma diminuição da vida útil do poço, além disso, dá gosto metálico na água, tornando-a desagradável para o consumo (LENNTECH, 2008).

Tabela 87 – Potabilidade das águas dos aquíferos aluvionares (de acordo com a Portaria nº 2914 do Ministério da Saúde).

PARÂMETRO	AQUÍFERO ALUVIONAR	
	QUANT.	%
Na⁺		
* < 200	22	88
> 200	03	12
F⁻		
* < 1,5	25	100
> 1,5	0	0
Fe		
* < 0,3	01	04
> 0,3	24	96
Cl⁻		
* < 250	21	84
> 250	04	16
SO₄⁻		
* < 250	25	100
> 250	0	0
NO₃⁻		
* < 10	25	100
> 10	0	0
NO₂⁻		
* < 1,0	25	100
> 1,0	0	0
NH₄⁺		
* < 1,5	21	84
> 1,5	04	16
DUREZA TOTAL		
* < 500	23	92
> 500	02	08
STD		
* < 1000	21	84
> 1000	04	16
pH		
* 6,0 - 9,5	25	100
< 6,0 e > 9,5	0	0

Fonte: O autor.

* = Padrão de aceitação para consumo humano de acordo com a portaria nº 2914/2011 – Ministério da Saúde.

Quant. = número de amostras por categoria.

(%) = percentual de amostras por categoria.

Os aluviões, por possuírem boa permeabilidade, porosidade e nível estático raso, constituem-se como uma fonte alternativa fácil, para exploração de água subterrânea. Por outro lado, são exatamente estas características que favorecem a migração de poluentes, tornando estas áreas de alto risco de poluição (GOMES, 2005, p. 193).

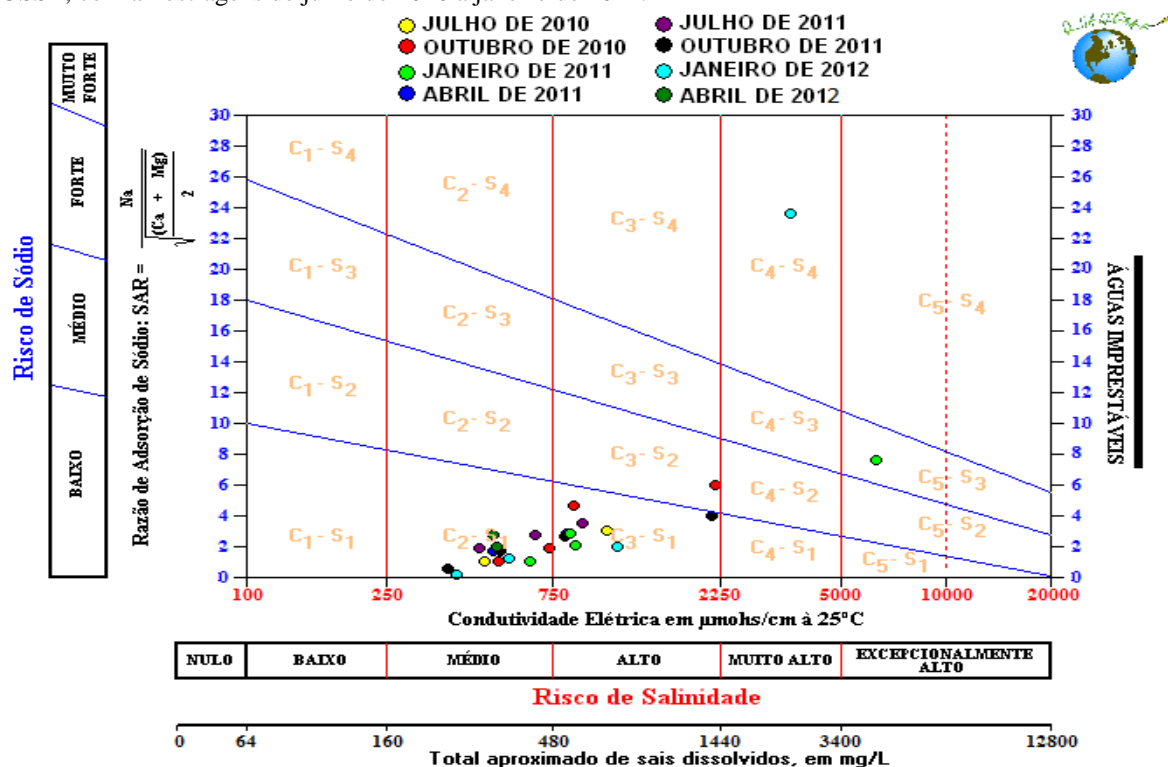
Estas fontes pontuais de poluição com os poços com elevado teor em nitrogênio amoniacal, da área de estudo, se tornam mais perigosas por se encontrarem num aluvião, onde suas características se apresentam mais susceptíveis a uma propagação mais rápida do poluente.

Adequação para Irrigação

Conforme a classificação das águas, determinada no diagrama da Figura 26, a maioria das amostras (88 %) se enquadra na categoria de sódio S_1 , que caracteriza águas com baixa concentração de sódio, que podem ser usadas para irrigação em quase todos os tipos de solo.

Quanto ao risco de salinidade, este vai de médio (C_2) a excepcionalmente alto (C_5) (Tabela 88). Na maioria dos poços as variações sazonais causam mudanças na salinidade da água, que pode ser notada na distribuição dos pontos de amostragem do diagrama (Figura 26), de maneira que o risco de salinidade geralmente aumenta ou diminui em uma categoria.

Figura 26 – Classificação das águas dos aquíferos aluvionares para fins de irrigação, segundo o diagrama do USSL, com amostragens de julho de 2010 a janeiro de 2012.



Fonte: O autor.

Tabela 88 – Classes de água para fins de irrigação dos aquíferos aluvionares durante todas as etapas de campo (julho/2010 a abril/2012).

CLASSE	NÚMERO DE AMOSTRAS	%
C ₂ - S ₁	13	52
C ₃ - S ₁	09	36
C ₃ - S ₂	01	04
C ₅ - S ₃	01	04
C ₄ - S ₄	01	04
TOTAL	25	100

Fonte: O autor.

5.8 Estratificação – Dinâmica Físico-química das Águas do Açude Banabuiú

Os ciclos dos elementos químicos e das substâncias estão inter-relacionados com processos biológicos, geoquímicos e físicos. A distribuição e a concentração dos elementos e substâncias na água dependem da “fixação” e da concentração ativa de carbono, hidrogênio, nitrogênio, fósforo e enxofre (macronutrientes) e dos micronutrientes (ferro, manganês, cobre e zinco). A taxa de reciclagem de nutrientes depende das inter-relações entre as misturas vertical e horizontal e a atividade e a biomassa dos organismos aquáticos (TUNDISI; TUNDISI, 2008, p. 286).

De acordo com o DNOCS, o açude Banabuiú pode atingir uma profundidade máxima de 57,7 metros. As amostragens da coluna d’água foram feitas na torre de controle. Os resultados encontram-se nas Tabelas 89 a 97. Os Gráficos 14 ao 29 mostram os resultados

com a média por profundidade do levantamento de 24 horas feita no açude Banabuiú nos dias 10 de maio e 05 de novembro de 2011.

5.8.1 Carbono

O carbono é um elemento utilizado em grandes quantidades pelos organismos fotossintetizantes e, portanto, é um dos elementos fundamentais no ciclo biogeoquímico das águas naturais (TUNDISI; TUNDISI, *op. cit.*, p. 287).

Sabe-se que a concentração de bicarbonato e carbonato determina a acidez ou alcalinidade das águas naturais. Nota-se que no Gráfico 14 o bicarbonato e a alcalinidade total são proporcionais, indicando uma correlação entre os mesmos. Esta correlação determina a característica alcalina do açude Banabuiú. Notou-se também que os valores de bicarbonato e alcalinidade total são menores no período chuvoso, pois a água da chuva é ácida (valores de pH levemente menores na época chuvosa) e faz com que a concentração dos mesmos diminua (Tabela 89 e Gráfico 15).

Em relação à profundidade, a concentração de bicarbonato e de alcalinidade total tende a aumentar suavemente, isto ocorre provavelmente devido a presença de carbono orgânico particulado (organismos vivos, detritos e sedimentos) no fundo do açude. Já a diminuição de pH no hipolímnio se deve provavelmente a produção de CO₂ e diminuição no consumo de CO₂ pela fotossíntese. Esteves (2011) afirma que o pH é uma das variáveis abióticas mais importantes nos ecossistemas aquáticos, e ao mesmo tempo uma das mais difíceis de ser interpretada.

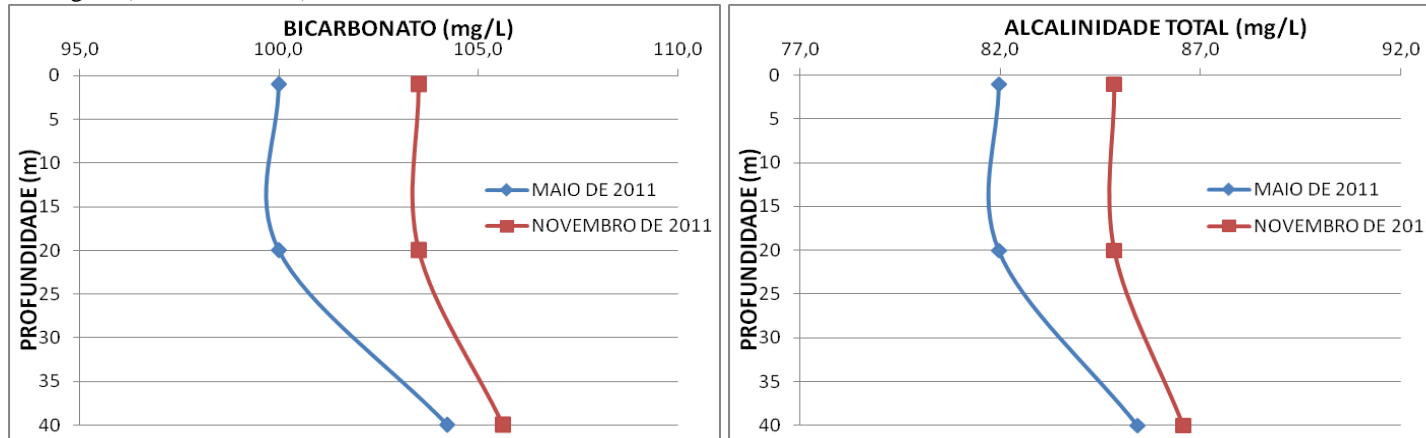
Bicarbonato, Alcalinidade Total e pH

Tabela 89 – Concentrações de Bicarbonato (mg/L), Alcalinidade Total (mg/L) e pH da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e estiagem (novembro/2011).

Bicarbonato (mg/L) MAIO DE 2011				Bicarbonato (mg/L) NOVEMBRO DE 2011			
HORA	01 metro	20 metros	40 metros	HORA	01 metro	20 metros	40 metros
08-10:00 horas	98,6	98,6	103,5	08-10:00 horas	103,5	103,5	103,5
12-14:00 horas	103,5	103,5	108,4	12-14:00 horas	103,5	98,6	113,4
16-18:00 horas	103,5	98,6	103,5	16-18:00 horas	98,6	103,5	103,5
20-22:00 horas	98,6	103,5	108,4	20-22:00 horas	98,6	103,5	98,6
00-02:00 horas	98,6	98,6	98,6	00-02:00 horas	103,5	98,6	108,4
04-06:00 horas	98,6	98,6	103,5	04-06:00 horas	113,4	108,4	103,5
08-10:00 horas	98,6	98,6	103,5	08-10:00 horas	103,5	108,4	108,4
MÉDIA	100,0	100,0	104,2	MÉDIA	103,5	103,5	105,6
Alcalinidade Total (mg/L) MAIO DE 2011				Alcalinidade Total (mg/L) NOVEMBRO DE 2011			
08-10:00 horas	80,8	80,8	84,8	08-10:00 horas	84,8	84,8	84,8
12-14:00 horas	84,8	84,8	88,9	12-14:00 horas	84,8	80,8	92,9
16-18:00 horas	84,8	80,8	84,8	16-18:00 horas	80,8	84,8	84,8
20-22:00 horas	80,8	84,8	88,9	20-22:00 horas	80,8	84,8	80,8
00-02:00 horas	80,8	80,8	80,8	00-02:00 horas	84,8	80,8	88,9
04-06:00 horas	80,8	80,8	84,8	04-06:00 horas	92,9	88,9	84,8
08-10:00 horas	80,8	80,8	84,8	08-10:00 horas	84,8	88,9	88,9
MÉDIA	82,0	82,0	85,4	MÉDIA	84,8	84,8	86,6
pH MAIO DE 2011				pH NOVEMBRO DE 2011			
08-10:00 horas	8,07	7,82	7,69	08-10:00 horas	8,24	7,85	7,68
12-14:00 horas	7,94	8,02	7,81	12-14:00 horas	8,32	7,83	7,73
16-18:00 horas	8,64	7,94	7,62	16-18:00 horas	8,45	7,86	7,72
20-22:00 horas	8,4	8,03	7,96	20-22:00 horas	8,42	7,85	7,7
00-02:00 horas	8,29	7,95	7,78	00-02:00 horas	8,34	7,8	7,69
04-06:00 horas	8,26	7,86	7,62	04-06:00 horas	8,22	7,87	7,76
08-10:00 horas	8,09	7,75	7,41	08-10:00 horas	8,25	7,91	7,73
MÉDIA	8,24	7,91	7,70	MÉDIA	8,32	7,85	7,72

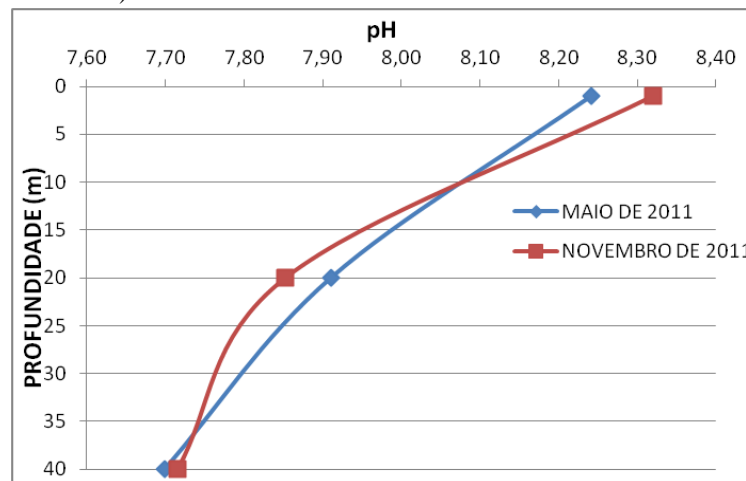
Fonte: O autor.

Gráfico 14 – Concentrações Médias de Bicarbonato (mg/L) e Alcalinidade Total (mg/L) da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e estiagem (novembro/2011).



Fonte: O autor.

Gráfico 15 - pH da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e estiagem (novembro/2011).



Fonte: O autor.

5.8.2 Fósforo

Segundo Esteves (2011), do ponto de vista limnológico, o fósforo total e o ortofosfato possuem maior relevância quanto a todas as formas de fósforo. O primeiro como estimativa do grau de fertilização (estado trófico) do ambiente aquático; e o segundo por ser a principal forma de fosfato assimilada pelos vegetais aquáticos, microalgas e bactérias.

De acordo com a classificação de Moss (1980) *apud* Tundisi e Tundisi (2008), o açude Banabuiú, por suas concentrações (média geral de 0,026 mg/L) em ortofosfato, comporta-se como “Lago em região cultivada ou desflorestadas com início de eutrofização”.

Esteves (2011) afirma que o fosfato liberado da rocha é carregado pelas águas do escoamento superficial e pode alcançar os diferentes ecossistemas aquáticos sob duas formas principais: solúvel (menos provável) e adsorvido nas argilas.

Parte dos fósforos sofre um processo de complexação durante períodos de intensa oxigenação dos sedimentos e, desta forma, torna-se não disponível periodicamente (TUNDISI; TUNDISI, *op. cit.*, p. 288). Provavelmente devido a este fator, encontrou-se o aumento das concentrações de ortofosfato com uma maior profundidade, pois quanto maior a profundidade menor a concentração de oxigênio.

Como se observa na Tabela 90 e no Gráfico 16, a concentração de fósforo (ortofosfato) é muito baixa, isto geralmente é atribuído à assimilação desse nutriente pelos organismos, e também, em condições de pH alto (açude Banabuiú possui uma média no fundo de 8,32), ocorre precipitação de fosfato, diminuindo sua concentração no ambiente aquático. Outro fator que explica a concentração do fósforo muito baixa no açude é sua temperatura elevada, pois segundo Esteves, *op. cit.* o metabolismo dos organismos é aumentado devido à temperatura, fazendo com que o fosfato seja assimilado ainda mais rápido e incorporado na sua biomassa. Já a média do teor do fósforo total no período chuvoso foi alta chegando a 0,081 mg/L a uma profundidade de 40 m, acima dos valores permitidos pela Resolução N° 357 do CONAMA (0,030 mg/L).

Tabela 90 – Concentrações de Ortofosfato (mg/L) e Fósforo Total (mg/L) da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e estiagem (novembro/2011).

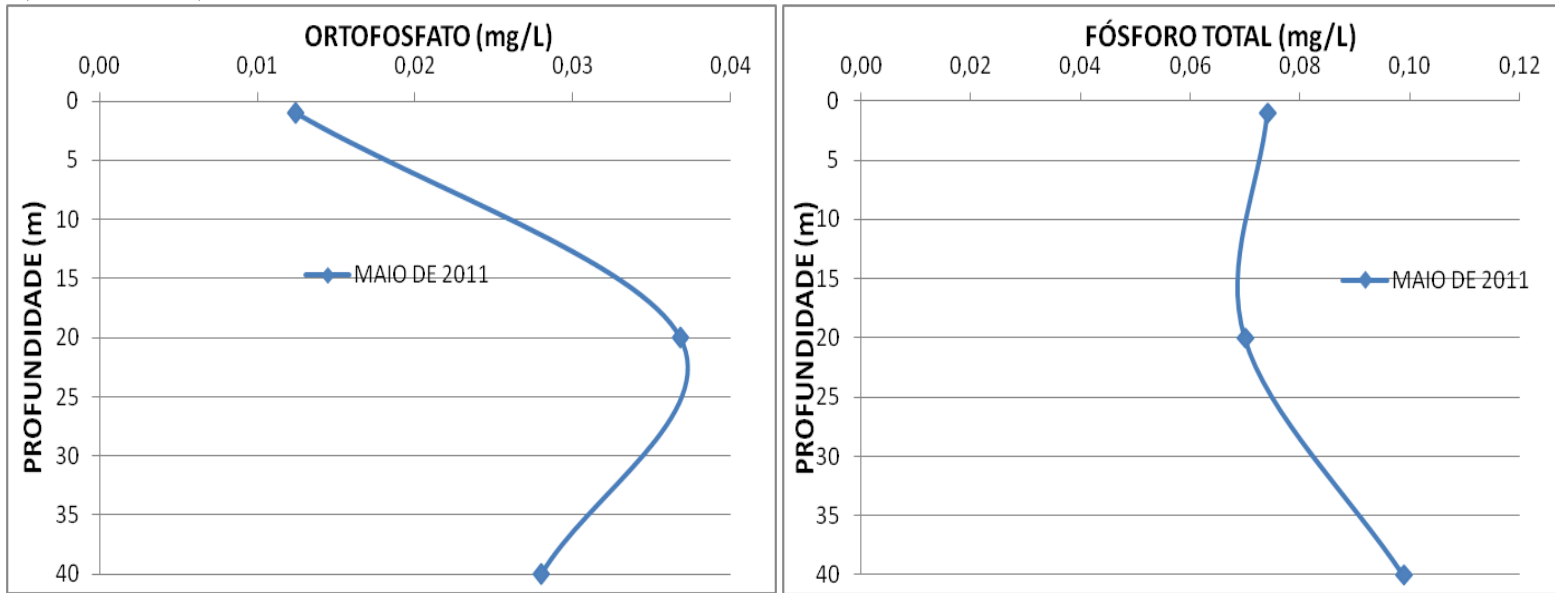
Ortofosfato (mg/L) MAIO DE 2011				Ortofosfato (mg/L) NOVEMBRO DE 2011			
HORA	01 metro	20 metros	40 metros	HORA	01 metro	20 metros	40 metros
08-10:00 horas	0,01	0,10	0,03	08-10:00 horas	<0,01	<0,01	<0,01
12-14:00 horas	<0,01	0,105	0,004	12-14:00 horas	0,026	<0,01	<0,01
16-18:00 horas	0,030	<0,01	*1,083	16-18:00 horas	<0,01	<0,01	<0,01
20-22:00 horas	0,041	0,045	<0,01	20-22:00 horas	<0,01	<0,01	<0,01
00-02:00 horas	<0,01	<0,01	<0,01	00-02:00 horas	<0,01	<0,01	<0,01
04-06:00 horas	<0,01	<0,01	<0,01	04-06:00 horas	<0,01	<0,01	<0,01
08-10:00 horas	<0,01	<0,01	<0,01	08-10:00 horas	<0,01	<0,01	<0,01
MÉDIA	0,012	0,037	0,028	MÉDIA	<0,01	<0,01	<0,01
Fósforo Total (mg/L) MAIO DE 2011				Fósforo Total (mg/L) NOVEMBRO DE 2011			
08-10:00 horas	<0,03	0,071	0,097	08-10:00 horas	<0,03	<0,03	<0,03
12-14:00 horas	0,059	0,043	0,113	12-14:00 horas	<0,03	<0,03	<0,03
16-18:00 horas	0,035	0,079	0,109	16-18:00 horas	<0,03	<0,03	<0,03
20-22:00 horas	0,091	0,099	0,091	20-22:00 horas	<0,03	<0,03	<0,03
00-02:00 horas	0,030	0,073	0,086	00-02:00 horas	<0,03	<0,03	<0,03
04-06:00 horas	0,261	0,091	0,100	04-06:00 horas	<0,03	<0,03	<0,03
08-10:00 horas	<0,03	0,034	0,095	08-10:00 horas	<0,03	<0,03	<0,03
MÉDIA	0,074	0,070	0,099	MÉDIA	<0,03	<0,03	<0,03

Fonte: O autor.

<0,03 e <0,01: Limites de Detecção.

*Este valor não entrou na média por ser muito discrepante.

Gráfico 16 – Concentrações de Ortofosfato (mg/L) e Fósforo Total (mg/L) da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e estiagem (novembro/2011).



Fonte: O autor.

5.8.3 Nitrogênio

De acordo com Tundisi e Tundisi (2008), em lagos estratificados, a concentração de nitrogênio amoniacal pode ser muito elevada, principalmente em condições de anoxia, onde o nitrato é reduzido à amônia.

Nota-se nos Gráficos 17 e 18 e na Tabela 91, que os compostos nitrogenados, tendem a crescer levemente com o aumento da profundidade (variação média de 0,3 mg/L). No entanto, o nitrogênio amoniacal demonstrou no período chuvoso um crescimento de 0,9 mg/L em relação a profundidade, isto provavelmente se deve ao carreamento de matéria orgânica para o interior do açude, causado pela chegada das chuvas. Outro fator que pode explicar este aumento com a profundidade, é que o nitrogênio amoniacal tende a crescer com a profundidade (ambiente anóxico), talvez por causa de bactérias desnitrificantes, que reduzem nitratos em nitritos, e conseqüentemente, nitritos em amônia. Estes valores demonstram que existe uma leve estratificação do açude Banabuiú no período chuvoso.

Quanto ao nitrito, esteve sempre abaixo do limite de detecção (0,001 mg/L). Isto ocorre por causa da instabilidade desta espécie química intermediária que pode ser oxidada a nitrato.

Os baixos valores nas concentrações dos compostos nitrogenados ocorrem devido, em grande parte, o ecossistema terrestre no entorno ser pobre em nutrientes.

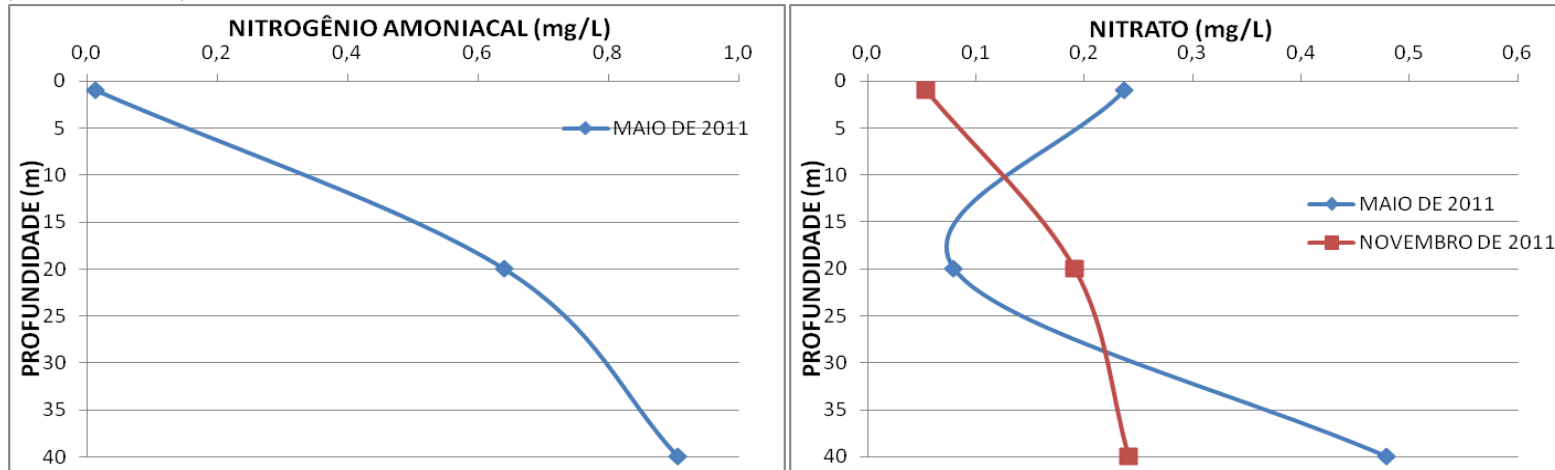
Tabela 91 – Concentrações de Nitrogênio Amoniacal, Nitrato, Nitrito e Nitrogênio Total (mg/L) da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e estiagem (novembro/2011).

Nitrogênio Amoniacal (mg/L) MAIO DE 2011				Nitrogênio Amoniacal (mg/L) NOVEMBRO DE 2011			
HORA	01 metro	20 metros	40 metros	HORA	01 metro	20 metros	40 metros
08-10:00 horas	<0,5	0,6	1,0	08-10:00 horas	<0,5	<0,5	<0,5
12-14:00 horas	<0,5	<0,5	1,1	12-14:00 horas	<0,5	<0,5	<0,5
16-18:00 horas	<0,5	0,9	0,7	16-18:00 horas	<0,5	<0,5	<0,5
20-22:00 horas	<0,5	0,5	0,8	20-22:00 horas	<0,5	<0,5	<0,5
00-02:00 horas	<0,5	0,9	0,9	00-02:00 horas	<0,5	<0,5	<0,5
04-06:00 horas	<0,5	0,9	0,8	04-06:00 horas	<0,5	<0,5	<0,5
08-10:00 horas	<0,5	<0,5	1,1	08-10:00 horas	<0,5	<0,5	<0,5
MÉDIA	<0,5	0,6	0,9	MÉDIA	<0,5	<0,5	<0,5
N-NO ₃ ⁻ - Nitrato (mg/L) MAIO DE 2011				N-NO ₃ ⁻ - Nitrato (mg/L) NOVEMBRO DE 2011			
08-10:00 horas	< 0,1	< 0,1	1,7	08-10:00 horas	0,1	0,2	0,4
12-14:00 horas	1,7	0,1	< 0,1	12-14:00 horas	0,1	0,3	0,3
16-18:00 horas	< 0,1	< 0,1	< 0,1	16-18:00 horas	0,0	0,1	0,1
20-22:00 horas	< 0,1	< 0,1	< 0,1	20-22:00 horas	0,1	0,2	0,3
00-02:00 horas	< 0,1	0,4	1,1	00-02:00 horas	0,0	0,3	0,3
04-06:00 horas	< 0,1	< 0,1	0,6	04-06:00 horas	0,1	0,1	0,3
08-10:00 horas	< 0,1	0,1	< 0,1	08-10:00 horas	0,0	0,1	0,1
MÉDIA	0,2	0,1	0,5	MÉDIA	0,1	0,2	0,2
Nitrogênio Total (mg/L) MAIO DE 2011				Nitrogênio Total (mg/L) NOVEMBRO DE 2011			
08-10:00 horas	0,4	0,6	0,7	08-10:00 horas	0,8	0,7	0,7
12-14:00 horas	0,8	0,5	0,9	12-14:00 horas	0,8	0,8	1,1
16-18:00 horas	0,6	0,8	0,7	16-18:00 horas	0,9	0,9	0,9
20-22:00 horas	0,7	0,6	0,8	20-22:00 horas	2,0	1,1	0,8
00-02:00 horas	0,4	0,6	0,8	00-02:00 horas	0,7	0,6	0,6
04-06:00 horas	0,5	0,6	0,9	04-06:00 horas	0,7	0,7	0,8
08-10:00 horas	0,4	0,4	0,8	08-10:00 horas	0,7	0,9	0,8
MÉDIA	0,5	0,6	0,8	MÉDIA	0,9	0,8	0,8

Fonte: O autor.

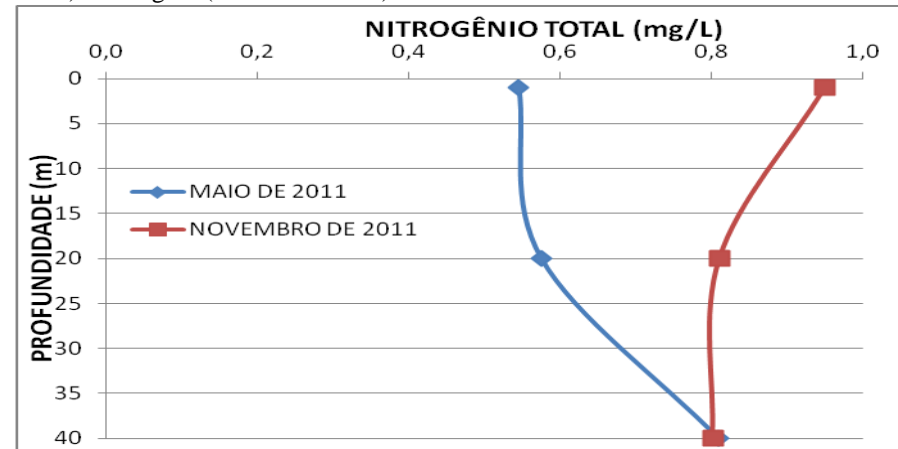
<0,1 e <0,5: Limites de Detecção.

Gráfico 17 – Concentrações de Nitrogênio Amoniacal (mg/L) e Nitrato (mg/L) da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e estiagem (novembro/2011).



Fonte: O autor.

Gráfico 18 – Concentração de Nitrogênio Total (mg/L) da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e estiagem (novembro/2011).



Fonte: O autor.

5.8.4 Sílica

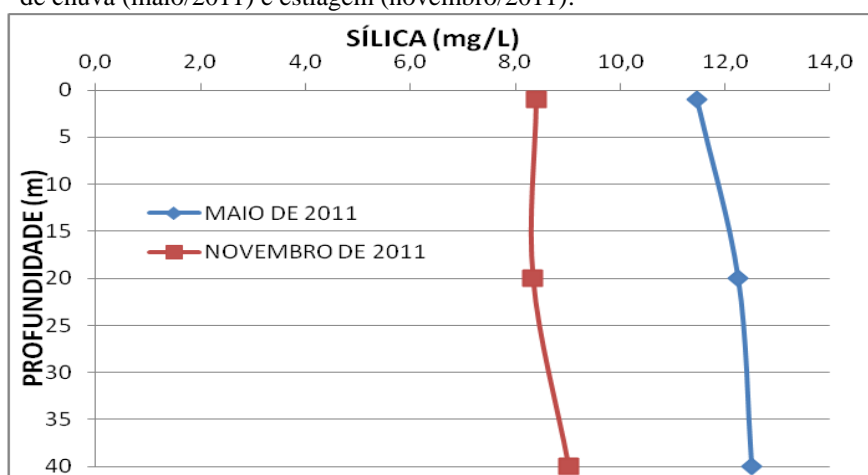
A sílica encontra-se presente nas águas naturais sob a forma de polímeros coloidais de silicato, provenientes do solo ou de organismos como as diatomáceas (TUNDISI; TUNDISI, 2008, p. 290). Nota-se na Tabela 92 e no Gráfico 19 que no período de estiagem os valores são fracamente menores. No caso do açude Banabuiú, a pouca sílica presente deve estar relacionada à lixiviação das rochas e ao influxo a partir dos rios Quixeramobim e Banabuiú no período de chuva. Os valores verticais constantes mostram que em relação à sílica, o reservatório é homogêneo.

Tabela 92 – Concentração de Sílica (mg/L) da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e estiagem (novembro/2011).

MAIO DE 2011				NOVEMBRO DE 2011			
HORA	01 metro	20 metros	40 metros	HORA	01 metro	20 metros	40 metros
08-10:00 horas	11,4	12,3	12,5	08-10:00 horas	9,3	8,8	9,3
12-14:00 horas	11,3	12,1	12,4	12-14:00 horas	9,3	8,8	9,3
16-18:00 horas	11,6	12,4	12,6	16-18:00 horas	8,0	8,8	9,3
20-22:00 horas	11,1	12,2	12,5	20-22:00 horas	9,3	8,8	9,3
00-02:00 horas	11,6	12,2	12,7	00-02:00 horas	7,0	8,0	10,0
04-06:00 horas	11,2	12,3	12,5	04-06:00 horas	8,0	8,0	8,0
08-10:00 horas	12,0	12,3	12,5	08-10:00 horas	8,0	7,0	8,0
MÉDIA	11,5	12,3	12,5	MÉDIA	8,4	8,3	9,0

Fonte: O autor.

Gráfico 19 – Concentração de Sílica (mg/L) da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e estiagem (novembro/2011).



Fonte: O autor.

5.8.5 Condutividade Elétrica

A distribuição vertical da condutividade elétrica (Tabela 93 e Gráfico 20) mostra-se homogênea, médias de $349 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ para o mês de maio de 2011 e $359 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ para o mês de novembro de 2011. Nota-se apenas um leve aumento na concentração de sais expressa pela condutividade elétrica, no período de estiagem, em decorrência da ausência de chuva e forte evaporação.

A concentração média de STD do açude Banabuiú corresponde a águas doces ($< 500 \text{ mg/L}$), esta concentração é sempre inferior a água do rio Quixeramobim.

Esta diferença é devida, provavelmente, tanto a mineralização da matéria depositada quanto ao influxo de água fluviais levemente salobras, como as do rio Quixeramobim, em época de estiagem.

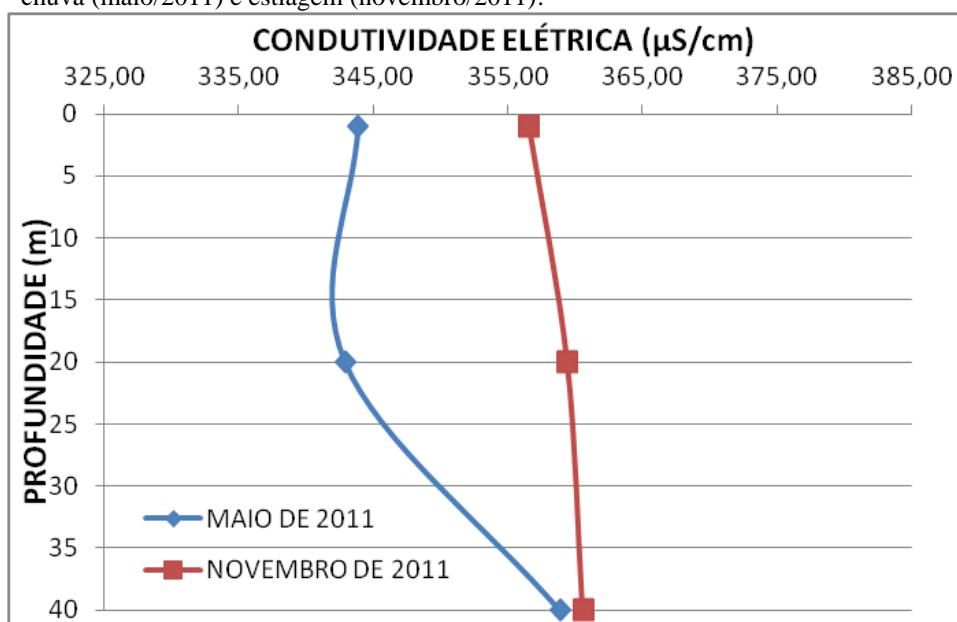
Nota-se também que no período de estiagem se tem um leve aumento dos valores de CE, STD, salinidade, pelo motivo da evaporação.

Tabela 93 – Condutividade elétrica em $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, STD (mg/L) e Salinidade (%) da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e estiagem (novembro/2011).

CE ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) MAIO DE 2011				CE ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) NOVEMBRO DE 2011			
HORA	01 metro	20 metros	40 metros	HORA	01 metro	20 metros	40 metros
08-10:00 horas	350	346	357	08-10:00 horas	347	350	362
12-14:00 horas	334	335	352	12-14:00 horas	356	363	355
16-18:00 horas	342	338	353	16-18:00 horas	361	354	361
20-22:00 horas	341	336	363	20-22:00 horas	359	362	355
00-02:00 horas	348	345	363	00-02:00 horas	363	363	364
04-06:00 horas	346	355	364	04-06:00 horas	348	361	364
08-10:00 horas	346	345	360	08-10:00 horas	362	363	363
MÉDIA	344	343	359	MÉDIA	357	359	361
STD (mg/L) MAIO DE 2011				STD (mg/L) NOVEMBRO DE 2011			
08-10:00 horas	245,0	242,2	249,9	08-10:00 horas	242,9	245,0	253,4
12-14:00 horas	233,8	234,5	246,4	12-14:00 horas	249,2	254,1	248,5
16-18:00 horas	239,4	236,6	247,1	16-18:00 horas	252,7	247,8	252,7
20-22:00 horas	238,7	235,2	254,1	20-22:00 horas	251,3	253,4	248,5
00-02:00 horas	243,6	241,5	254,1	00-02:00 horas	254,1	254,1	254,8
04-06:00 horas	242,2	248,5	254,8	04-06:00 horas	243,6	252,7	254,8
08-10:00 horas	242,2	241,5	252	08-10:00 horas	253,4	254,1	254,1
MÉDIA	241,0	240,0	251,0	MÉDIA	250,0	252,0	252,0
Salinidade (%) MAIO DE 2011				Salinidade (%) NOVEMBRO DE 2011			
08-10:00 horas	0,18	0,17	0,18	08-10:00 horas	0,18	0,18	0,18
12-14:00 horas	0,17	0,17	0,18	12-14:00 horas	0,18	0,18	0,18
16-18:00 horas	0,17	0,17	0,18	16-18:00 horas	0,18	0,18	0,18
20-22:00 horas	0,17	0,17	0,18	20-22:00 horas	0,18	0,18	0,18
00-02:00 horas	0,17	0,17	0,18	00-02:00 horas	0,18	0,18	0,18
04-06:00 horas	0,17	0,17	0,18	04-06:00 horas	0,18	0,18	0,18
08-10:00 horas	0,17	0,17	0,18	08-10:00 horas	0,18	0,18	0,18
MÉDIA	0,17	0,17	0,18	MÉDIA	0,18	0,18	0,18

Fonte: O autor.

Gráfico 20 – Condutividade elétrica em $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e estiagem (novembro/2011).



Fonte: O autor.

5.8.6 Cloreto e Sulfato

O cloreto e o sulfato (Tabela 94 e Gráficos 21 e 22), de acordo com Tundisi e Tundisi (2008), são os principais ânions, no entanto, são raramente limitantes, em razão de suas altas concentrações encontradas em águas naturais. No açude Banabuiú, a concentração média foi de 48,8 mg/L para o cloreto e 2,7 mg/L para o sulfato. Estes elementos, assim como a CE, não apresentam grandes variações com a profundidade, e no ciclo nictemeral (24 h) também não se observa tendência na distribuição das concentrações.

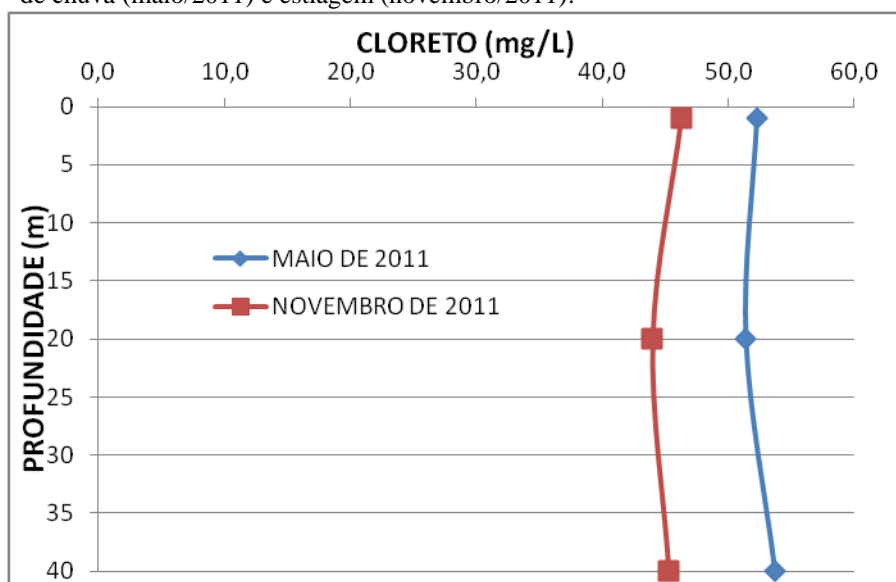
Tabela 94 – Concentrações de Cloreto (mg/L) e Sulfato (mg/L) da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e estiagem (novembro/2011).

Cloreto (mg/L) MAIO DE 2011				Cloreto (mg/L) NOVEMBRO DE 2011			
HORA	01 metro	20 metros	40 metros	HORA	01 metro	20 metros	40 metros
08-10:00 horas	52,0	50,0	54,0	08-10:00 horas	44,0	44,0	46,0
12-14:00 horas	52,0	52,0	54,0	12-14:00 horas	44,0	42,0	50,0
16-18:00 horas	52,0	52,0	54,0	16-18:00 horas	46,0	44,0	38,0
20-22:00 horas	52,0	52,0	54,0	20-22:00 horas	54,0	46,0	50,0
00-02:00 horas	54,0	52,0	54,0	00-02:00 horas	44,0	42,0	45,0
04-06:00 horas	50,0	50,0	54,0	04-06:00 horas	46,0	46,0	44,0
08-10:00 horas	54,0	52,0	52,0	08-10:00 horas	46,0	44,0	44,0
MÉDIA	52,3	51,4	53,7	MÉDIA	46,3	44,0	45,3

Sulfato (mg/L) MAIO DE 2011				Sulfato (mg/L) NOVEMBRO DE 2011			
HORA	01 metro	20 metros	40 metros	HORA	01 metro	20 metros	40 metros
08-10:00 horas	2,3	3,2	2,7	08-10:00 horas	2,8	2,0	2,8
12-14:00 horas	2,8	2,8	2,8	12-14:00 horas	2,8	2,8	2,8
16-18:00 horas	2,8	2,8	2,8	16-18:00 horas	2,8	2,8	2,8
20-22:00 horas	2,0	2,8	2,0	20-22:00 horas	2,8	2,8	2,8
00-02:00 horas	2,5	2,5	2,5	00-02:00 horas	2,8	2,8	2,8
04-06:00 horas	2,0	4,0	2,0	04-06:00 horas	2,8	2,8	2,8
08-10:00 horas	2,0	3,4	2,3	08-10:00 horas	2,8	2,8	2,8
MÉDIA	2,3	3,1	2,4	MÉDIA	2,8	2,7	2,8

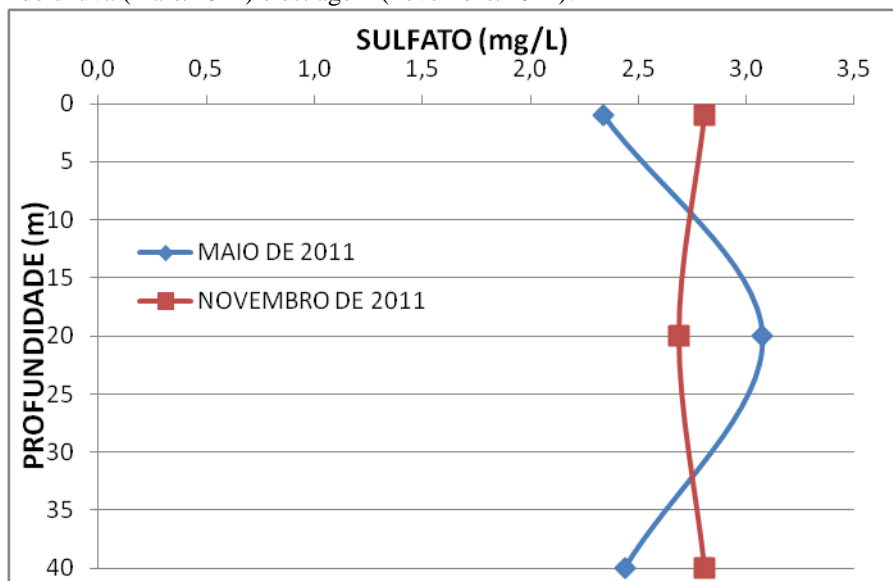
Fonte: O autor.

Gráfico 21 – Concentração de Cloreto (mg/L) da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e estiagem (novembro/2011).



Fonte: O autor.

Gráfico 22 – Concentração de Sulfato (mg/L) da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e estiagem (novembro/2011).



Fonte: O autor.

5.8.7 Dureza Total, Cálcio e Magnésio

Segundo Santos *in* Feitosa *et al.* (2008), a dureza é definida como poder de consumo de sabão por determinada água ou a capacidade de neutralizar o sabão pelo efeito do cálcio, magnésio ou outros elementos como Fe, Mn, Cu, Ba etc. O cálcio e o magnésio são os principais responsáveis pela dureza.

Quanto maior a dureza, maior a dificuldade de produzir sabão. Nota-se que, em ambos os períodos, os valores tendem a permanecer com pouca variação com o aumento da profundidade, elevando-se suavemente no período chuvoso e diminuindo levemente no período de estiagem (Tabela 95 e Gráfico 23), ou seja, corroborando a similaridade com o bicarbonato, já que o cálcio e o magnésio se apresentam geralmente sob a forma de bicarbonato. Devido aos seus valores em torno de 100 mg/L (dureza total) é classificada como “águas semi-duras”.

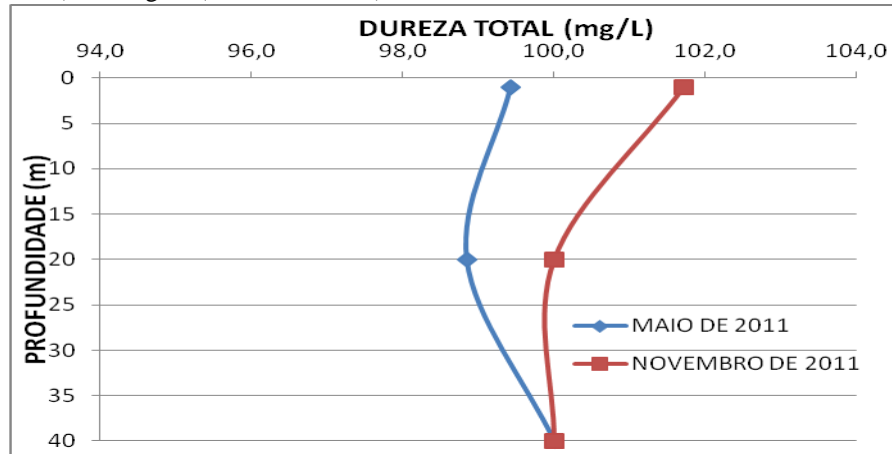
Observou-se também a inversa proporcionalidade do cálcio e magnésio (Tabela 95 e Gráfico 24) nos períodos de chuva e de estiagem, pois o cálcio apresenta concentrações maiores no período de chuva, ocorrendo o contrário com o magnésio, isto ocorre porque o magnésio é mais solúvel, e devido à chuva, suas concentrações tendem a diminuir.

Tabela 95 – Concentrações de Dureza Total (mg/L), Cálcio (mg/L) e Magnésio (mg/L) da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e estiagem (novembro/2011).

Dureza Total (mg/L) MAIO DE 2011				Dureza Total (mg/L) NOVEMBRO DE 2011			
HORA	01 metro	20 metros	40 metros	HORA	01 metro	20 metros	40 metros
08-10:00 horas	100,0	96,0	100,0	08-10:00 horas	108,0	100,0	100,0
12-14:00 horas	104,0	100,0	104,0	12-14:00 horas	100,0	100,0	96,0
16-18:00 horas	96,0	100,0	100,0	16-18:00 horas	100,0	100,0	100,0
20-22:00 horas	100,0	100,0	100,0	20-22:00 horas	100,0	100,0	100,0
00-02:00 horas	100,0	100,0	100,0	00-02:00 horas	96,0	100,0	100,0
04-06:00 horas	100,0	100,0	100,0	04-06:00 horas	104,0	100,0	100,0
08-10:00 horas	96,0	96,0	96,0	08-10:00 horas	104,0	100,0	104,0
MÉDIA	99,4	98,9	100,0	MÉDIA	101,7	100,0	100,0
Cálcio (mg/L) MAIO DE 2011				Cálcio (mg/L) NOVEMBRO DE 2011			
08-10:00 horas	22,4	22,4	22,4	08-10:00 horas	17,6	17,6	17,6
12-14:00 horas	22,4	22,4	22,4	12-14:00 horas	17,6	17,6	17,0
16-18:00 horas	22,4	24,0	24,0	16-18:00 horas	17,6	17,6	17,6
20-22:00 horas	20,8	22,4	22,4	20-22:00 horas	17,6	17,6	17,6
00-02:00 horas	22,4	22,4	24,0	00-02:00 horas	17,6	17,6	17,6
04-06:00 horas	24,0	22,4	24,0	04-06:00 horas	19,0	17,6	17,6
08-10:00 horas	22,4	24,0	22,4	08-10:00 horas	17,6	17,6	17,6
MÉDIA	22,4	22,9	23,1	MÉDIA	17,8	17,6	17,5
Magnésio (mg/L) MAIO DE 2011				Magnésio (mg/L) NOVEMBRO DE 2011			
08-10:00 horas	10,6	9,6	10,6	08-10:00 horas	15,0	13,0	13,0
12-14:00 horas	11,5	10,6	11,5	12-14:00 horas	13,0	13,0	13,0
16-18:00 horas	9,6	9,6	9,6	16-18:00 horas	13,0	13,0	13,0
20-22:00 horas	11,5	10,6	10,6	20-22:00 horas	13,0	13,0	13,0
00-02:00 horas	10,6	10,6	9,6	00-02:00 horas	12,0	13,0	13,0
04-06:00 horas	9,6	10,6	9,6	04-06:00 horas	13,0	13,0	13,0
08-10:00 horas	9,6	8,6	9,6	08-10:00 horas	14,0	13,0	14,0
MÉDIA	10,4	10,0	10,1	MÉDIA	13,3	13,0	13,1

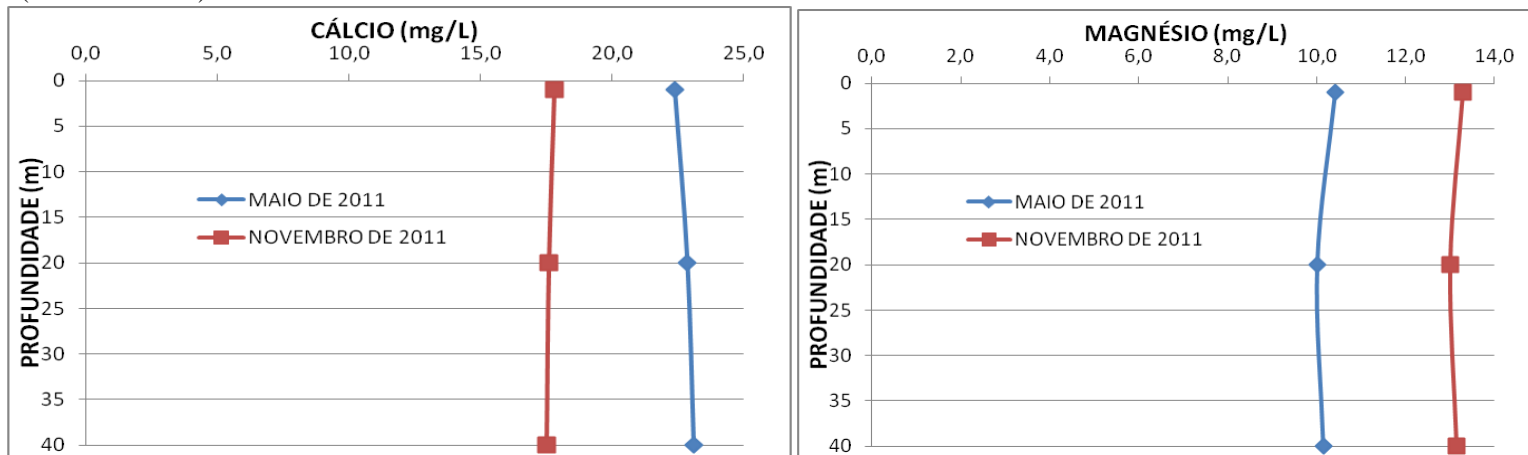
Fonte: O autor.

Gráfico 23 – Concentração de Dureza Total (mg/L) da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e estiagem (novembro/2011).



Fonte: O autor.

Gráfico 24 – Concentrações de Cálcio (mg/L) e Magnésio (mg/L) da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e estiagem (novembro/2011).



Fonte: O autor.

5.8.8 Sódio e Potássio

Segundo Santos *in* Feitosa *et al.* (2008), o sódio é o principal responsável pelo aumento constante da salinidade das águas naturais do ponto de vista catiônico. O potássio aparece em pequena quantidade devido à sua participação intensa em processos de trocas catiônicas.

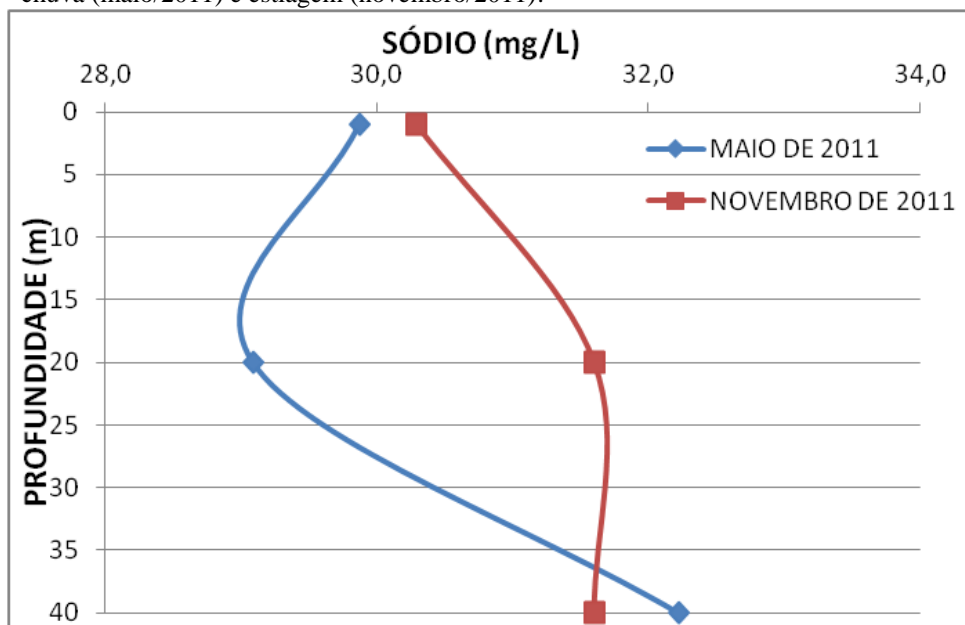
Notou-se que o sódio apresenta uma relação com a salinidade (Gráficos 20 e 25), assim como se mostra na Tabela 96 e no Gráfico 25. Os valores de Na são levemente maiores no período de estiagem devido à evaporação, no entanto, em profundidade os valores se invertem, isto ocorre porque no período chuvoso o influxo dos rios é mais forte, a água sendo mais fria é mais densa, levando assim estas águas de influxo para o fundo do açude aonde aumenta brandamente os valores de sódio proveniente dos rios. Como o potássio é muito participativo em processos de trocas catiônicas, no período de estiagem, se associa a outros elementos diminuindo suas concentrações (Tabela 95 e Gráfico 26).

Tabela 96 – Concentrações de Sódio (mg/L) e Potássio (mg/L) da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e estiagem (novembro/2011).

Sódio (mg/L) MAIO DE 2011				Sódio (mg/L) NOVEMBRO DE 2011			
HORA	01 metro	20 metros	40 metros	HORA	01 metro	20 metros	40 metros
08-10:00 horas	29,9	29,9	35,4	08-10:00 horas	21,1	24,2	24,2
12-14:00 horas	24,4	18,9	24,4	12-14:00 horas	27,2	30,3	30,3
16-18:00 horas	24,4	18,9	29,9	16-18:00 horas	33,4	30,3	30,3
20-22:00 horas	35,4	35,4	35,4	20-22:00 horas	33,4	36,4	36,4
00-02:00 horas	35,4	35,4	35,4	00-02:00 horas	30,3	30,3	30,3
04-06:00 horas	29,9	29,9	29,9	04-06:00 horas	30,3	33,4	33,4
08-10:00 horas	29,9	35,4	35,4	08-10:00 horas	36,4	36,4	36,4
MÉDIA	29,9	29,1	32,2	MÉDIA	30,3	31,6	31,6
Potássio (mg/L) MAIO DE 2011				Potássio (mg/L) NOVEMBRO DE 2011			
08-10:00 horas	6,0	6,0	6,0	08-10:00 horas	4,0	4,0	4,0
12-14:00 horas	6,0	6,0	6,0	12-14:00 horas	4,0	6,0	6,0
16-18:00 horas	6,0	3,0	6,0	16-18:00 horas	6,0	4,0	6,0
20-22:00 horas	6,0	6,0	6,0	20-22:00 horas	6,0	6,0	6,0
00-02:00 horas	6,0	6,0	6,0	00-02:00 horas	6,0	6,0	6,0
04-06:00 horas	6,0	6,0	6,0	04-06:00 horas	6,0	6,0	6,0
08-10:00 horas	6,0	6,0	6,0	08-10:00 horas	6,0	6,0	6,0
MÉDIA	6,0	5,6	6,0	MÉDIA	5,4	5,4	5,7

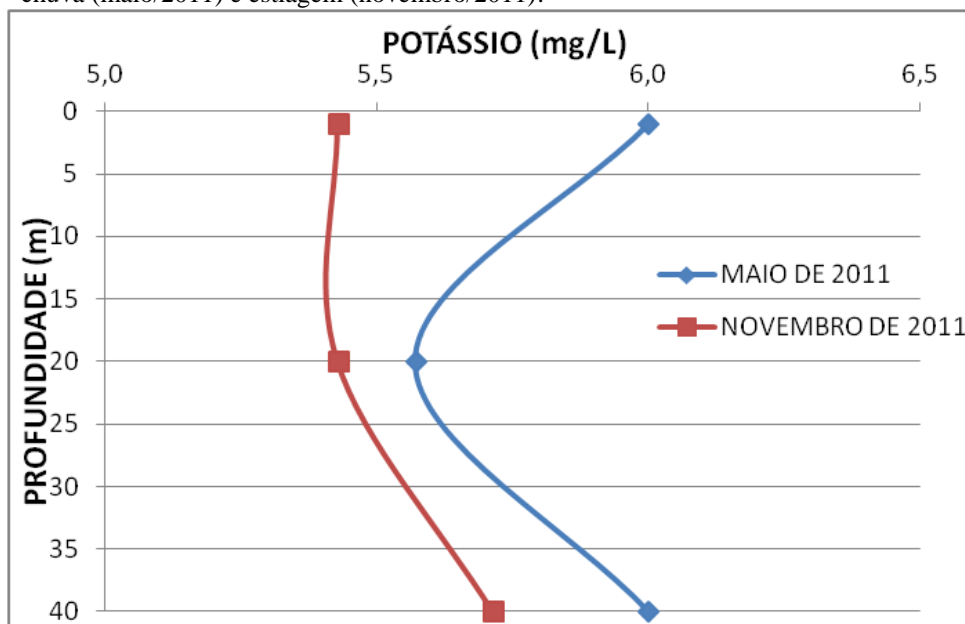
Fonte: O autor.

Gráfico 25 – Concentração de Sódio (mg/L) da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e estiagem (novembro/2011).



Fonte: O autor.

Gráfico 26 – Concentração de Potássio (mg/L) da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e estiagem (novembro/2011).



Fonte: O autor.

5.8.9 Ferro, Temperatura e Oxigênio Dissolvido

Segundo Santos *in* Feitosa *et al.* (2008), o ferro (Tabela 97 e Gráfico 27) ocorre geralmente associado ao manganês e confere à água um sabor amargo e coloração amarela e turva, decorrente de sua precipitação quando oxidado. O oxigênio é um gás pouco solúvel em água, sendo sua solubilidade função da temperatura, da pressão e dos sais dissolvidos na água.

De acordo com Esteves (2011), em concentrações baixas de oxigênio ocorre uma redução no ferro e no manganês, que se solubilizam provocando um aumento destes elementos no hipolímnio. No epilímnio, onde se tem muito oxigênio, o ferro e o manganês permanecem em níveis baixos. No açude Banabuiú, a distribuição vertical do ferro ocorre como exemplificado anteriormente por Esteves.

O oxigênio dissolvido na água é um dos parâmetros mais importantes em limnologia. Quando ocorre circulação completa em um lago pouco produtivo, o oxigênio dissolvido distribui-se aproximadamente de uma forma uniforme até o fundo (ortograda). O consumo elevado de oxigênio, decorrente da concentração de organismos ou de material biológico em decomposição, pode ocorrer na porção inferior do metalímnio (heterograda negativa) (TUNDISI; TUNDISI, 2008, p. 111).

Esteves, *op. cit.*, afirma que em lagos tropicais o perfil vertical da concentração de oxigênio é determinado, principalmente, pela alta temperatura e pelas características morfométricas do lago.

Tundisi e Tundisi, *op. cit.*, afirmam que as diferenças de densidade se acentuam com temperaturas mais elevadas, razão pela qual o processo de estratificação e estabilização do lago é maior mesmo quando as diferenças térmicas entre temperaturas da superfície e da profundidade são relativamente pequenas.

Nota-se que a temperatura (Tabela 97 e Gráfico 28) é mais baixa no período seco, isto se deve a uma maior velocidade dos ventos neste período, percebe-se também que os valores tendem a diminuir com a profundidade, isto ocorre porque os raios solares não chegam a altas profundidades e, no inverno devido também a água da chuva com temperatura mais baixa (densidade maior) ir direto para o fundo do reservatório, ocasionando assim uma estratificação térmica que vai da superfície (epilímnio) à profundidade (hipolímnio).

No açude Banabuiú, como pode se perceber na Tabela 97 e no Gráfico 28, se tem valores médios de oxigênio dissolvido entre 12,5 e 2,5 mg/L, enquanto que Gomes (1998) encontrou na lagoa do Uruaú, zona costeira do Ceará, valores entre 7,0 e 4,3 mg/L, em ambos os estudos existe uma queda do oxigênio dissolvido com a profundidade. No reservatório de

Banabuiú, no período de estiagem tem-se uma ortograda, já no período de chuva tem-se uma heterograda negativa.

Tabela 97 – Concentração de Ferro (mg/L), Temperatura (°C) e Oxigênio Dissolvido (mg/L) da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e estiagem (novembro/2011).

Ferro (mg/L) MAIO DE 2011				Ferro (mg/L) NOVEMBRO DE 2011			
HORA	01 metro	20 metros	40 metros	HORA	01 metro	20 metros	40 metros
08-10:00 horas	0,1	0,5	0,8	08-10:00 horas	< 0,1	< 0,1	< 0,1
12-14:00 horas	0,2	0,2	0,9	12-14:00 horas	< 0,1	< 0,1	< 0,1
16-18:00 horas	0,2	0,7	0,8	16-18:00 horas	< 0,1	< 0,1	< 0,1
20-22:00 horas	0,2	0,6	0,8	20-22:00 horas	< 0,1	< 0,1	< 0,1
00-02:00 horas	0,2	0,6	1,0	00-02:00 horas	< 0,1	< 0,1	< 0,1
04-06:00 horas	0,2	0,7	0,9	04-06:00 horas	< 0,1	< 0,1	< 0,1
08-10:00 horas	0,1	0,3	0,8	08-10:00 horas	< 0,1	< 0,1	< 0,1
MÉDIA	0,2	0,5	0,8	MÉDIA	SM	SM	SM
Oxigênio Dissolvido (mg/L) MAIO DE 2011				Oxigênio Dissolvido (mg/L) NOVEMBRO DE 2011			
08-10:00 horas	6,5	3,3	4,5	08-10:00 horas	3,5	2,5	3,0
12-14:00 horas	14,9	9,8	4,3	12-14:00 horas	3,8	2,8	2,5
16-18:00 horas	10,5	5,8	9,3	16-18:00 horas	3,3	2,8	2,5
20-22:00 horas	9,5	4,8	7,8	20-22:00 horas	3,0	2,8	3,0
00-02:00 horas	7,5	3,8	6,5	00-02:00 horas	3,3	2,5	2,5
04-06:00 horas	9,3	3,8	5,3	04-06:00 horas	3,0	2,5	2,0
08-10:00 horas	6,3	3,0	4,8	08-10:00 horas	2,8	2,3	3,5
MÉDIA	12,5	5,0	6,0	MÉDIA	3,3	2,5	2,8
Temperatura (°C) MAIO DE 2011				Temperatura (°C) NOVEMBRO DE 2011			
08-10:00 horas	25,5	25,3	24,2	08-10:00 horas	24,1	23,8	23,4
12-14:00 horas	25,8	25,3	25,0	12-14:00 horas	24,3	23,8	22,8
16-18:00 horas	26,8	25,3	24,7	16-18:00 horas	24,8	23,8	23,6
20-22:00 horas	26,6	25,3	24,5	20-22:00 horas	24,3	23,8	23,5
00-02:00 horas	26,7	25,4	24,2	00-02:00 horas	24,1	23,8	23,4
04-06:00 horas	25,7	25,3	23,4	04-06:00 horas	24,0	23,8	23,1
08-10:00 horas	25,7	25,3	24,7	08-10:00 horas	24,0	23,8	23,3
MÉDIA	26,1	25,3	24,4	MÉDIA	24,2	23,8	23,3

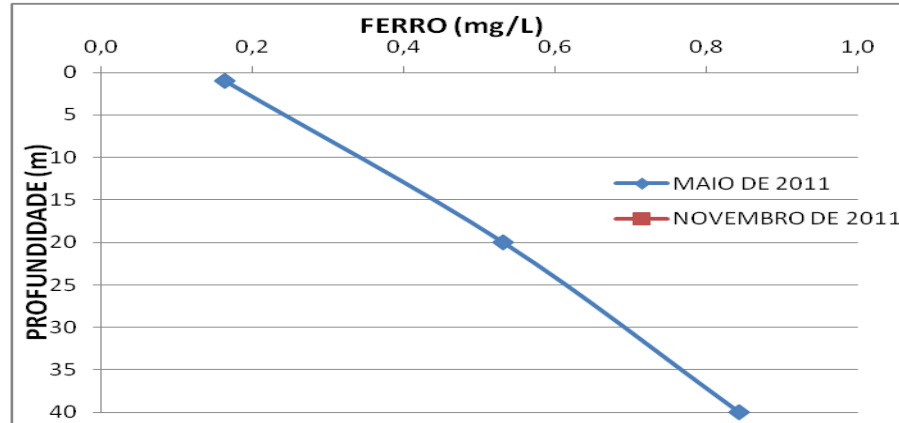
Fonte: O autor.

< 0,1: Limite de Detecção.

SM: Sem possibilidade calcular a média.

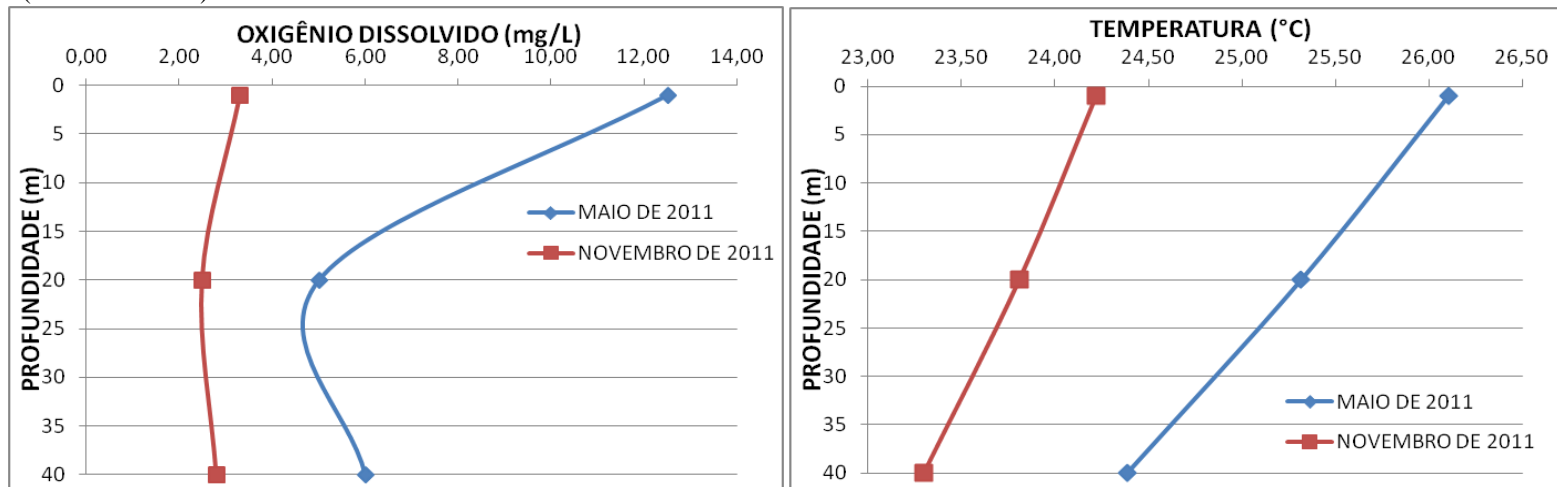
Em negrito: Valores Acima do Permitido Pela Portaria N° 2914 do Ministério da Saúde.

Gráfico 27 – Concentração de Ferro (mg/L) da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e estiagem (novembro/2011).



Fonte: O autor.

Gráfico 28 – Concentrações de Oxigênio Dissolvido (mg/L) e Temperatura (°C) da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e estiagem (novembro/2011).



Fonte: O autor.

5.9 Metais Pesados

Baird (2002) afirma que os metais pesados, por serem não degradáveis, podem acumular-se nos componentes do ambiente (água, plantas, solo etc.) onde manifestam sua toxicidade.

Os metais se diferenciam dos compostos orgânicos tóxicos por não serem totalmente degradáveis em formas não tóxicas, embora eles possam ser transformados em formas insolúveis e, portanto, biologicamente indisponíveis a menos que eles sejam novamente convertidos para espécies solúveis. O destino final para metais pesados normamente são os solos e sedimentos (BAIRD, 2011, p. 685).

O termo metal pesado é geralmente empregado para designar tanto os elementos com densidade maior de 5 g/cm^3 como aqueles que também são tóxicos em pequeníssimas concentrações, como o arsênio (metaloide), antimônio (metaloide), selênio (não metal) etc. Os locais de fixação final dos metais pesados são os solos, entretanto, dependendo das condições químicas do solo estes podem ser lixiviados e atingirem o lençol freático.

Metais pesados como Cd, Cr, Pb e Hg, podem ser introduzidos na cadeia alimentar pela adição de fertilizantes, principalmente os fosfatados (SHARPLEY; MENZEL, 1987). Esses fertilizantes são derivados de rochas fosfáticas, que naturalmente contém metais pesados, que no processo de manufatura não são eliminados.

Os resultados das análises de metais pesados nos aquíferos aluvionares, e nas águas dos rios Quixeramobim e Banabuiú (Tabela 98), mostram que esses elementos podem estar em concentrações muito baixas (70,5 % das amostras) e algumas vezes (11,1 % das amostras) inferiores ao limite de detecção (Quadro 07). A baixa incidência e concentração de metais pesados foram confirmadas nas duas amostragens, em abril e outubro de 2011, contudo os elementos Mn e Al apresentaram valores alarmantes, ou seja, preocupantes, quando presentes em águas de abastecimento. O Mn e Al se tornam “disponíveis” porque são produtos do intemperismo que ocorre nos solos (lixiviação).

O Quadro 08 mostra os valores de referência para potabilidade da água de acordo com a Portaria nº 2914/2011 do Ministério da Saúde.

Tabela 98 – Concentração dos metais tóxicos presentes nas águas do rio Banabuiú e aquíferos aluvionares.

AMOSTRAS	µg Al/L		µg Mn/L		µg Ba/L		µg Ni/L		µg Cu/L		µg Cd/L		µg Se/L	
	abr/11	out/11	abr/11	out/11	abr/11	out/11	abr/11	out/11	abr/11	out/11	abr/11	out/11	abr/11	out/11
AB01	887,0	73,9	92,3	20,5	396,4	96,8	6,1	2,5	69,4	17,0	1,4	<LD	6,0	7,0
PA01	197,0	74,5	2.460,1	6.101,0	651,5	216,6	4,9	<LD	153,0	160,5	<LD	3,9	5,0	6,5
PA02	133,8	141,5	2.217,0	1.087,7	469,1	235,6	5,1	<LD	27,6	39,0	<LD	<LD	4,0	6,0
PA03	3.664,6	3.068,9	1.025,8	2.354,6	366,5	563,2	10,0	<LD	63,6	48,3	<LD	5,0	5,8	5,4
PA04	148,3	95,7	109,6	1.125,3	301,5	24,1	2,5	5,0	30,1	38,2	<LD	<LD	9,8	4,0
PC01	84,3	125,2	330,8	365,5	81,2	133,2	56,0	58,2	39,7	41,0	3,8	<LD	18,0	36,7
PC02	162,0	150,1	290,4	269,9	123,8	330,6	49,0	270,0	28,9	32,0	3,5	4,8	58,7	46,0
PC03	216,0	177,7	41,8	83,0	199,6	286,6	57,3	84,6	37,6	71,0	4,1	5,9	30,0	35,0
PC04	10.862,6	119,6	124,4	<LD	256,7	840,0	6,0	4,0	41,6	35,3	<LD	4,3	18,3	16,0
PC05	14.777,8	921,0	70,2	40,1	80,2	88,8	8,1	4,0	197,7	189,0	<LD	<LD	12,0	12,1
RB01	4.194,4	510,8	210,3	216,6	180,8	234,7	6,7	5	50,9	40,3	<LD	<LD	9,0	9,1
RB02	320,1	68,1	45,4	82,1	153,2	1.606,6	2,0	5,0	8,1	12,3	<LD	<LD	8,2	6,0
RB03	293,7	34,9	247,3	47,6	187,9	176,0	2,7	3,3	24,0	8,9	<LD	<LD	4,0	4,6
RB04	124,2	99,8	88,5	47,1	147,6	139,3	2,1	2,6	11,5	8,4	<LD	<LD	4,0	8,5
RB05	490,8	130,3	90,0	39,8	161,0	81,7	3,9	3,3	8,3	8,8	<LD	<LD	8,0	8,0
RB06	1.276,1	130,0	199,0	95,6	185,0	159,3	3,8	2,0	8,9	9,4	<LD	<LD	<LD	<LD
RQ01	969,7	170,6	102,8	481,3	139,1	202,5	3,4	7,6	10,6	8,7	<LD	<LD	7,0	5,6
RQ02	156,8	52,8	90,5	113,4	138,5	148,6	1,9	4,2	12,1	10,8	<LD	<LD	5,0	9,3

Fonte: O autor.

Em negrito: Resultado acima dos valores permitidos pela portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde.

LD: Limite de detecção.

NC: Não Coletado.

Quadro 07 – Valores do limite de detecção (Ld) do aparelho.

Elementos (µg/L)	Pb	Cd	Al	Mn	Ba	Cu	Se	Ni
LD	3,0	1,0	23,0	1,0	4,0	9,0	5,0	0,9

LD – Limite de detecção.

Quadro 08 – Valores de referência para potabilidade da água de acordo com a Portaria n° 2914/2011 do Ministério da Saúde.

Elementos (µg/L)	Pb	Cd	Al	Mn	Ba	Cu	Se	Ni
VMP	10	05	200	100	700	2.000	10	70

Fonte: Portaria n° 2914/2011 do Ministério da Saúde.

VMP: Valor Máximo Permitido.

Os elementos níquel, cobre e cádmio variaram de um mínimo de 1,9; 8,1 e 1,4 µg/L a um máximo de 270,0; 197,7 e 5,9 µg/L, com teor médio de 21,0; 44,5 e 4,1 µg/L, respectivamente. O níquel e o cádmio apresentaram valor acima do estabelecido (70 e 5 µg/L) para águas potáveis em apenas uma amostra cada, PC02 (270 µg/L para Ni) e PC03 (84,6 µg/L para Ni e 5,9 µg/L para Cd), respectivamente.

Os teores de alumínio variaram de um mínimo de 34,9 a um máximo de 14.777,8 µg/L (ponto PC05), com teor médio de 1.252,9 µg/L. Este elemento ficou com 38,9 % das amostras acima do estabelecido (200 µg/L) para águas potáveis. O alumínio é o terceiro elemento mais abundante da terra, e provavelmente, os valores elevados nos pontos de amostragem da área estudada se devem pela sua presença no meio. Segundo Pohling (2009), o consumo de alimentos que estiveram em contato com alumínio, sob o ponto de vista toxicológico, não causa maiores problemas à saúde, no entanto, a ingestão em concentrações excessivas é muito perigosa.

Os valores de manganês variaram de um mínimo de 20,5 a um máximo de 6.101,0 µg/L (ponto PA01), com teor médio de 583,1 µg/L. Este elemento ficou com 55,6 % das amostras acima do estabelecido (100 µg/L) para águas potáveis, ressalta-se que a presença de elevados teores se destaca nos poços aluvionares. De acordo com Pohling (2009), o manganês encontra-se presente em muitos solos, sedimentos e rochas metamórficas, geralmente é associado aos minerais de ferro, e sua ocorrência em abastecimento público é mais um problema econômico do que um perigo a saúde, pois assim como o ferro, deixa manchas escuras nas roupas, louças e tende a se depositar em tubulações de sistemas de distribuição de água e em instalações sanitárias.

Fenzl (1986) analisa que devido à pequena mobilidade geoquímica do chumbo, suas concentrações nas águas naturais são baixas. A ingestão deste elemento pode provocar a morte. Na região estudada tem-se um cenário semelhante ao citado pelo autor acima, onde, este elemento-traço tóxico não apresentou valores acima do permitido (10 µg/L) pela portaria, pelo contrário, todas as amostras estudadas se apresentaram abaixo do limite de detecção.

O selênio apresentou valores que variaram de 4 a 58,7 µg/L (ponto PC02), e teor médio de 12,9 µg/L. Este elemento ficou com 22,2 % das amostras acima do estabelecido (10 µg/L) para águas potáveis. Os valores elevados deste elemento se deram nos poços do domínio hidrogeológico cristalino, e devem resultar dos mesmo processos responsáveis pela elevada salinidade das águas deste domínio.

As concentrações do bário variaram de um mínimo de 24,1 a um máximo de 1.606,6 µg/L (ponto RB02), com teor médio de 271,8 µg/L. A presença de bário nas águas do Estado do Ceará é comum, como aponta o trabalho realizado por Frizzo (2005), em 234 amostras de águas superficiais e subterrâneas, estando o bário presente em todas as amostras, geralmente com valores inferiores ao estabelecido pela legislação brasileira para águas potáveis. E como aponta o trabalho realizado por Moura (2008) no PIMN, onde o elemento-traço Ba apareceu de forma constante mas com resultados abaixo do valor máximo permitido pelo Ministério da Saúde.

As principais fontes de metais para as águas são efluentes de indústrias (alimentícia, de tintas etc). Na área, a economia é voltada para a agricultura irrigada, não sendo encontradas indústrias, no entanto, todas as amostras aparecem com teores de algum elemento-traço acima do permitido pela Portaria n° 2914/2011 do Ministério da Saúde para águas potáveis. Quanto ao uso de fertilizantes, esse parece não contribuir de modo relevante para o aumento do teor de metais pesados na água, mas é necessário o monitoramento da qualidade da água uma vez que o seu uso é contínuo.

Caracteristicamente, as águas do domínio hidrogeológico cristalino do Estado do Ceará são concentradas nos elementos maiores, resultando em águas salobras. Analisando o teor de metais pesados, nota-se que o alumínio também é abundante neste domínio, podendo atingir 14,8 mg/L na área estudada. Mas, quanto aos outros metais, as concentrações são semelhantes ao encontrado nos aluviões ou nos rios Quixeramobim e Banabuiú e açude Banabuiú.

As águas do PIMN estudadas por Moura (2008), em sua maioria, não apresentaram valores acima do limite detectável, o que vale ressaltar que a metodologia usada era outra e que este limite de detecção ficava acima do que a Portaria n° 2914/2011 exigia para os metais pesados Pb, Cd, Se e Ni. Já as águas aqui estudadas oferecem risco à saúde quanto à presença dos metais pesados se não tratadas devidamente.

5.10 Isótopos de Oxigênio-18 e Deutério

5.10.1 Águas Meteóricas

De acordo com Santiago *et al. in* Feitosa *et al.* (2008), a composição isotópica das águas de chuva depende da altitude orográfica, da longitude geográfica, da distância à costa e está sujeita a efeitos de temperatura e de quantidade pluviométrica.

Os resultados de Oxigênio-18 e Deutério da chuva da região de Banabuiú são apresentados a seguir (Tabela 99 e Gráfico 29) para posteriormente serem discutidos.

Tabela 99 – Valores de $\delta^{18}\text{O}$ (‰), δD (‰) e precipitação para água de chuva da região de Banabuiú, no período estudado.

Mês de Observação	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)	Precipitação (mm)
Dez/10	-3,58	-18,41	45,8
Jan/11	-3,49	-17,58	103,1
Fev/11	-2,01	-5,98	108,8
Mar/11	-1,98	-6,35	54,4
Abr/11	-4,20	-26,91	200,4
Mai/11	-3,62	-19,99	74,4
Jun/11	-0,97	-0,06	37,2
Jul/11	-1,94	-4,92	74,4
Ago/11	0,39	11,28	11,5
Out/11	-1,86	-5,56	20,0
Jan/12	-1,19	2,53	80,2
Fev/12	-1,09	-0,66	11,9
Mar/12	-1,81	-4,32	54,4
Abr/12	-0,92	2,19	14,3
Mai/12	-1,62	0,52	19,9
Jun/12	-1,27	0,82	20,3
DESVIO PADRÃO	1,22	10,05	NC
MÉDIA	-1,95	-5,84	58,19
MÉDIA PONDERADA	-2,63	-11,67	NC

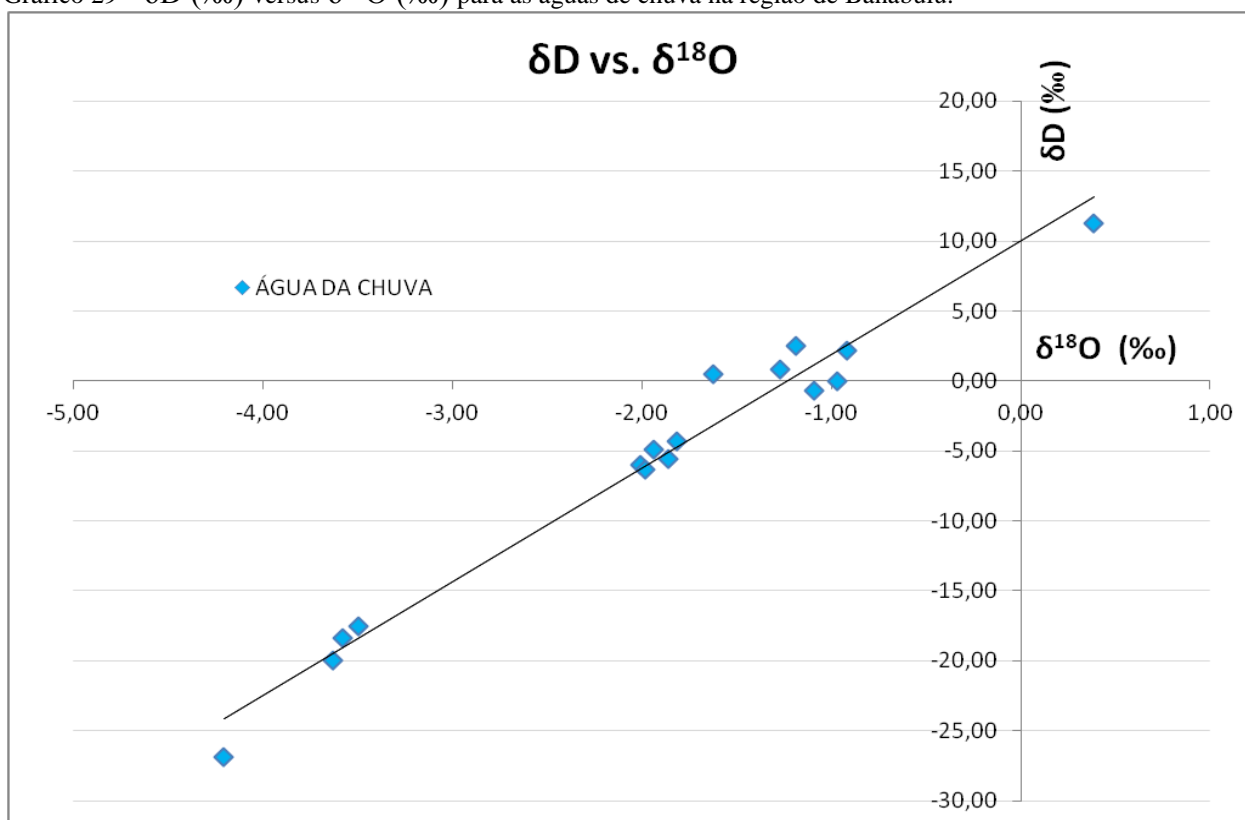
Fonte: O autor.

NC: Não calculado.

Reta Meteórica

Elaborou-se para a região de Banabuiú a Equação 17 da reta meteórica local baseada nos dados mensais de $\delta^{18}\text{O}$ (‰) e δD (‰) do período de dezembro de 2010 a junho de 2012 (Gráfico 29).

$$\delta\text{D} (\text{‰}) = 8,12 \delta^{18}\text{O} \text{‰} + 9,97 \text{‰} \quad (17)$$

Gráfico 29 – δD (‰) versus $\delta^{18}O$ (‰) para as águas de chuva na região de Banabuiú.

Fonte: O autor.

Percebe-se a semelhança entre a reta meteórica calculada para a região de Banabuiú e a *Global Meteoric Water Line* ($\delta D (\text{‰}) = 8 \delta^{18}O (\text{‰}) + 10 (\text{‰})$), conseqüentemente, pelo coeficiente angular de 8,12 da reta meteórica calculada para a região de Banabuiú, conclui-se que as águas para o período estudado não apresentaram evaporação após a queda da chuva. Segundo Santiago (1984), águas que sofreram processo de evaporação apresentam também uma relação linear entre $\delta^{18}O$ (‰) e δD (‰), mas o coeficiente angular é menor. Santiago *et al.* (1975), em amostras de água do açude Santo Antonio de Russas, no Ceará, apresentaram um coeficiente angular igual a 5, e estes valores podem ser ainda menores dependendo da umidade do ar.

Efeito de Temperatura

Segundo Santiago *et al.* (1975), a formação da chuva é um processo de equilíbrio termodinâmico, chamado processo de Rayleigh. Nele, a separação isotópica é função da temperatura, sendo mais forte a temperaturas baixas. No entanto, pode estar correlacionado ao efeito de quantidade, pois na época de chuva a temperatura é menor, influenciando assim no efeito da temperatura.

Dansgaard (1964) *apud* IAEA (1981b), analisando chuvas de mais ou menos 40 lugares com temperaturas médias anuais ($t_a/^\circ\text{C}$), numa faixa de -50 até +25 $^\circ\text{C}$, verificou que as Equações 18 e 19 abaixo apresentam boa concordância com os resultados experimentais.

$$\delta^{18}\text{O} (\text{‰}) = 0,69 t_a/^\circ\text{C} - 13,6 \quad (18)$$

$$\delta\text{D} (\text{‰}) = 5,6 t_a/^\circ\text{C} - 100 \quad (19)$$

À título de curiosidade, conseguiu-se elaborar para a região de estudo equações (20 e 21) com boas concordâncias para o efeito temperatura, estas foram baseadas nos dados de monitoramento no ano de 2011, são elas:

$$\delta^{18}\text{O} (\text{‰}) = 0,57 t_a/^\circ\text{C} - 17,24 \quad (20)$$

$$\delta\text{D} (\text{‰}) = 5,28 t_a/^\circ\text{C} - 146,46 \quad (21)$$

Com estas equações pode-se determinar a temperatura atmosférica em épocas passadas, ou possuindo os dados históricos de temperatura, pode-se estimar os valores de $\delta^{18}\text{O}$ (‰) e δD (‰) de um período passado para a região de Banabuiú.

Efeito de Quantidade

Em lugares de pequena variação da temperatura, o efeito quantidade é responsável por até 76 % da variação sazonal no $\delta^{18}\text{O}$ (‰); o que ocorre é que durante a condensação, o vapor remanescente fica progressivamente empobrecido em isótopos pesados e, com ele, a água produzida. Assim a chuva no início de um evento é mais pesada isotopicamente do que no final, e chuvas menos intensas são mais pesadas do que chuvas abundantes (efeito quantidade) (SANTIAGO, *op. cit.*, p. 109.).

Encontrou-se na região estudada um valor médio para $\delta^{18}\text{O}$ (‰) e δD (‰) de -1,95 ‰ e -5,84 ‰, respectivamente, e uma média ponderada para $\delta^{18}\text{O}$ (‰) e δD (‰) de -2,63 ‰ e -11,67 ‰, respectivamente. A diferença nestes valores da média e da média ponderada reflete o efeito de quantidade, mesmo efeito averiguado por Santiago (1984) no

Estado do Ceará (Fortaleza, Pentecoste, Inhuporanga e Paramoti) que encontrou um valor médio de $-2,60\text{‰}$ e uma média ponderada de $-3,10\text{‰}$ para $\delta^{18}\text{O}$ (‰).

Efeito Continental

Segundo IAEA (1981a), à medida que uma massa de ar úmida se desloca para o interior do continente e se precipita parcialmente, vai formando uma massa de ar cada vez mais empobrecida em ^{18}O . Desta forma, quanto mais distante da costa, menor o conteúdo de ^{18}O na água da chuva (Efeito Continental).

De acordo com a IAEA, *op. cit.*, o valor médio ponderado de $\delta^{18}\text{O}$ (‰) para chuva de Fortaleza é $-2,92$, baseado em 12 anos de estudo, entre 1965 e 1976 (1966 e 1967 não foram avaliados).

A dependência da concentração de oxigênio-18 com a distância à costa (efeito continental) foi avaliada por Santiago, *op. cit.*, a partir de dados de oxigênio-18 das chuvas de Fortaleza (10 km da costa), Pentecoste (50 km), Inhuporanga (65 km) e Paramoti (75 km). A equação de correlação $\delta^{18}\text{O}$ x distância elaborada por Santiago foi (Equação 22):

$$\delta^{18}\text{O} (\text{‰}) = - 0,019 (x/\text{km}) - 1,43 \quad (22)$$

Extrapolando esta Equação 22 para as chuvas de Banabuiú, que dista aproximadamente 156 km do mar, encontra-se $\delta^{18}\text{O}$ (‰) = $- 4,39\text{‰}$. No entanto, encontrou-se para o período entre dezembro de 2010 e junho de 2012 uma média ponderada de $\delta^{18}\text{O}$ (‰) = $- 2,63\text{‰}$. Porém, deve-se considerar que os valores de δ (‰) tem uma grande variação interanual, dependendo basicamente do efeito de quantidade. Como tanto a equação de Santiago, *op. cit.*, quanto o valor encontrado neste estudo são de anos individuais, não pode-se esperar boa concordância (nos 10 anos representados para Fortaleza em IAEA, *op. cit.*, o $\delta^{18}\text{O}$ (‰) anual varia de $- 1,38$ a $- 7,09$. Percebe-se também, que a equação do efeito continental não é aplicável para este período de estudo, possivelmente a baixa pluviosidade (anos secos ocasionam anos sem efeito de quantidade) no período de pesquisa tenha influenciado no resultado.

5.10.2 Água do Açude Banabuiú

Os resultados de Oxigênio-18 e Deutério do açude Banabuiú (amostras coletadas na borda do reservatório) apresentam variação temporal (Tabela 100 e Gráficos 30, 31 e 32), no entanto, estes isótopos necessitam do auxílio dos seguintes parâmetros: volume de água acumulado (hm^3), precipitação (mm), condutividade elétrica ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) e concentração de cloreto ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); estes parâmetros auxiliam os resultados dos isótopos para uma melhor visualização/identificação da variação temporal existente na área estudada.

Tabela 100 – Variação do volume acumulado, $\delta^{18}\text{O}$ (‰), CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$) e Cl⁻ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$).

AÇUDE BANABUIÚ	Volume Acumulado (hm^3)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	f (%)	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Cl⁻ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
jul/10	1195,9	0,27	SI	377	50
out/10	1066,3	0,66	11	331	60
jan/11	962,2	0,98	SI	323	54
abr/11	1002,2	0,42	SI	318	56
jul/11	1461,7	0,34	SI	323	50
out/11	1386,5	1,07	05	308	52
jan/12	1276,0	-0,74	SI	350	58
abr/12	1200,8	0,15	SI	346	62

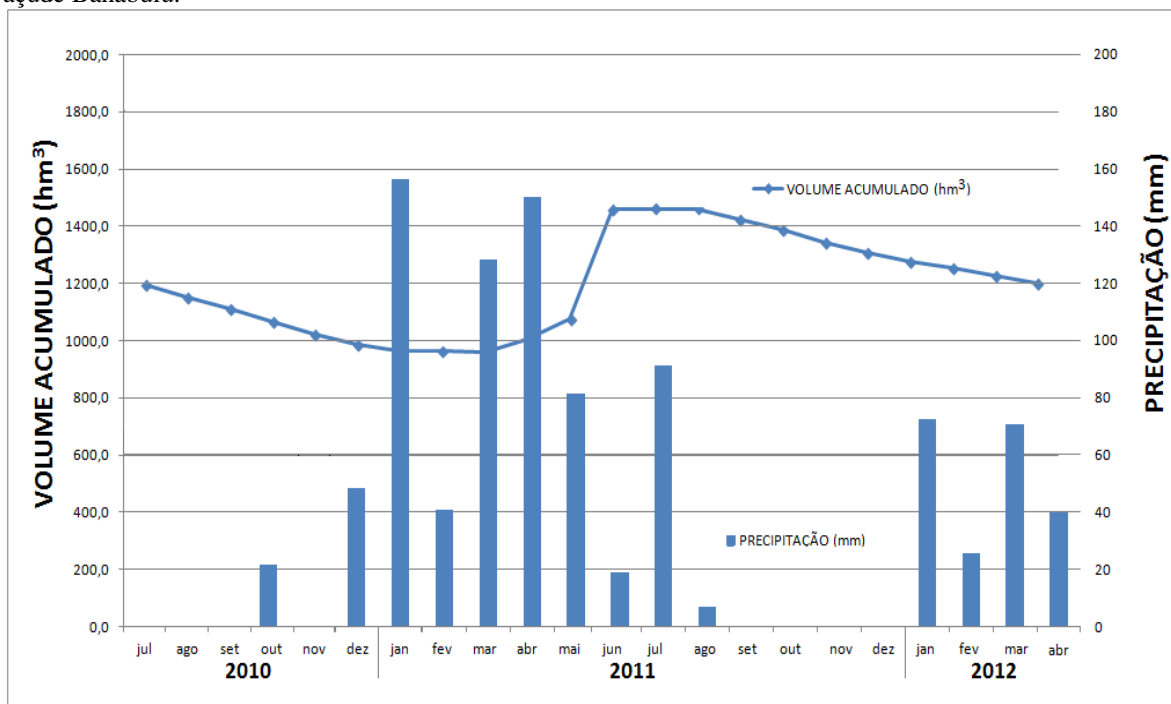
Fonte do Volume Acumulado: COGERH.

Fonte: O autor.

SI: Sem Informação.

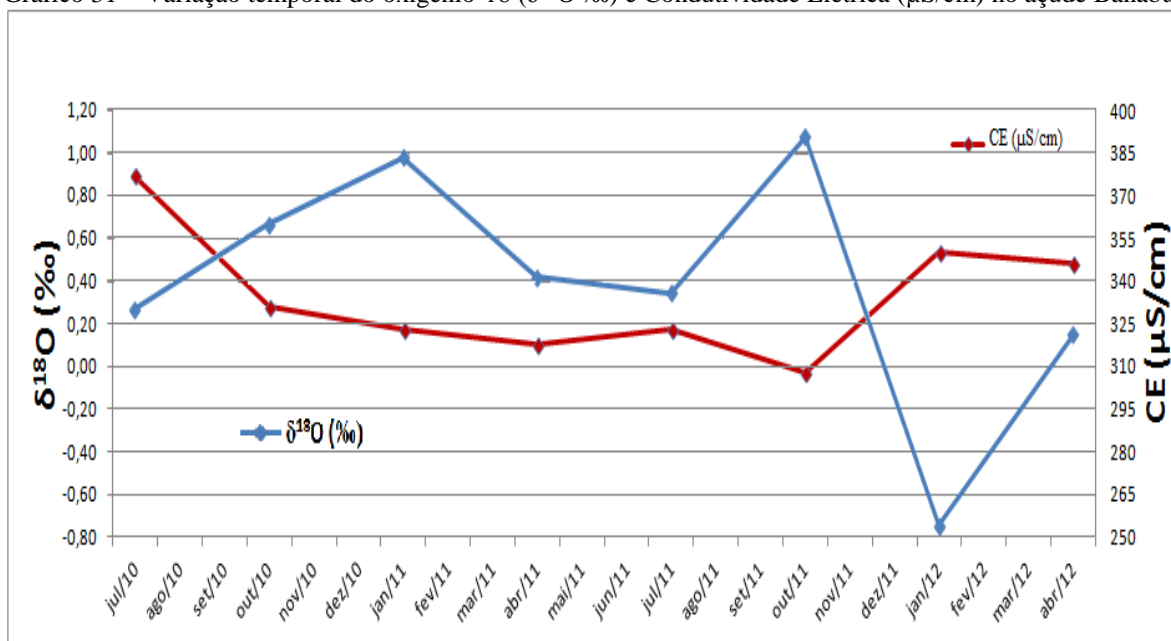
f: fração de V/V_0 do açude.

Gráfico 30 – Variação temporal da precipitação mensal (mm) no posto Banabuiú e volume acumulado (hm^3) no açude Banabuiú.

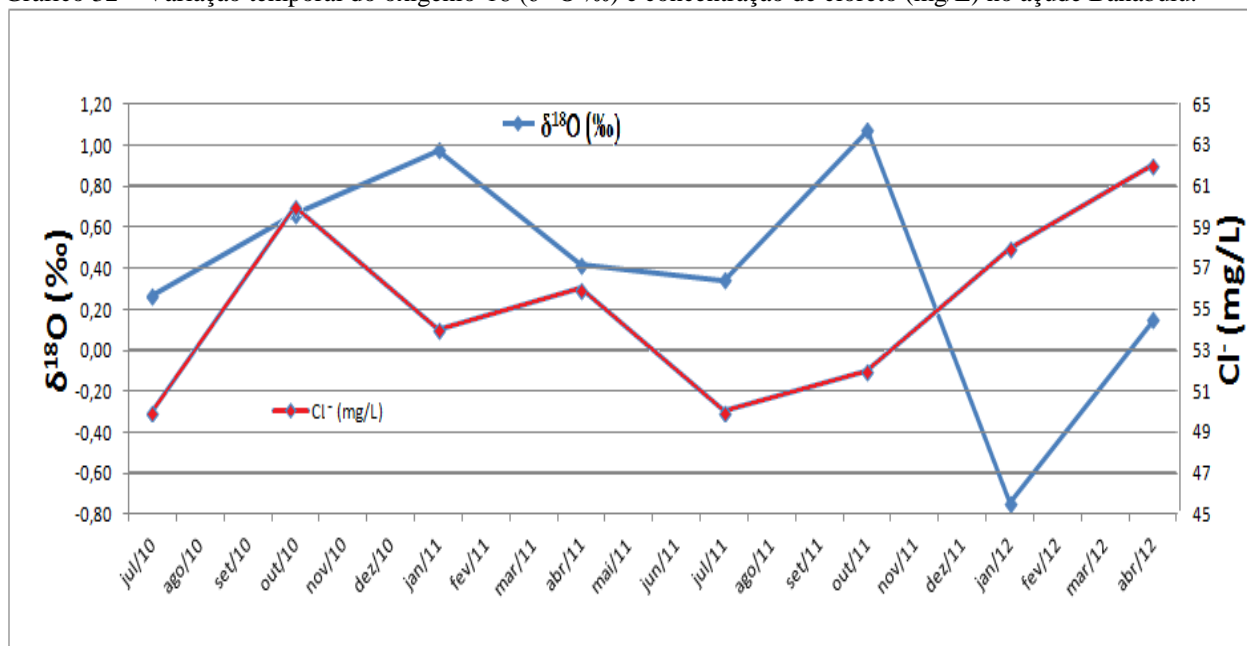


Fonte dos dados: COGERH (2013) e FUNCEME (2013).

Gráfico 31 – Variação temporal do oxigênio-18 ($\delta^{18}\text{O}$ ‰) e Condutividade Elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) no açude Banabuiú.



Fonte: O autor.

Gráfico 32 – Variação temporal do oxigênio-18 ($\delta^{18}\text{O}$ ‰) e concentração de cloreto (mg/L) no açude Banabuiú.

Fonte: O autor.

Como mostrado anteriormente na tabela e nos gráficos, os parâmetros sofreram uma variação sazonal durante os anos de 2010, 2011 e 2012. O volume do açude Banabuiú, no final do período de estiagem de 2010, chegou a somente 61,5 % (984,6 hm^3) de sua capacidade máxima de acumulação e no final do período chuvoso de 2011 alcançou 91,3 % (1.461,7 hm^3). Este aumento no volume foi acompanhado por uma leve redução nos valores de CE e da concentração de Cl^- que, para a mesma estação, passaram de 331 para 323 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ e 60 para 50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectivamente.

Em outubro de 2011 (período de estiagem), o $\delta^{18}\text{O}$ era de +1,07 ‰, indicando águas que sofreram evaporação. Com o período chuvoso do ano de 2012 iniciado (janeiro de 2012), o $\delta^{18}\text{O}$ baixou para -0,74 ‰.

Nota-se que em 2011 (Gráfico 32), meses de janeiro a abril (primeiras chuvas), a concentração de cloreto aumenta, provavelmente causada pela lixiviação dos solos em seu entorno. Após este período, as chuvas ficam estabelecidas e estes sais sofrem maior diluição, ocorrendo assim uma diminuição na sua concentração deste íon na água de renovação. De acordo com Andrade *et al.* (2010), em algumas regiões de clima semiárido, onde o período chuvoso é curto, o aparecimento de intensas precipitações promove o deslocamento de sais de uma área de melhor para outra de pior drenagem.

A precipitação pluviométrica de janeiro a abril de 2012 (98,0 mm) foi inferior à do ano de 2011 (475,7 mm). Averigua-se que entre o mês de junho de 2011 e abril de 2012 o volume do açude Banabuiú continuou diminuindo (Gráfico 30), isto devido à vazão afluyente ter sido menor que as perdas por evaporação mais as retiradas.

O gradiente de evaporação de $\delta^{18}\text{O}$ para o açude Banabuiú, no período de estiagem de julho a outubro de 2010, foi de $\Delta\delta^{18}\text{O} = 0,39\text{‰}$ (de 0,27 a 0,66 ‰) e $\Delta f \approx 11\%$ (de 1.195,9 a 1.066,3 hm^3), e resultou em um gradiente de 0,35 ‰ / 10 %. Já no período de estiagem de julho a outubro de 2011, a variação de $\Delta\delta^{18}\text{O} = 0,73\text{‰}$ (de 0,34 a 1,07 ‰) com $\Delta f = 5\%$ (de 1.461,7 a 1.386,5 hm^3) gerou um gradiente de evaporação de 1,46 ‰ / 10 %.

O comportamento do açude Banabuiú durante a época chuvosa de 2011 (janeiro a abril) caracteriza-se por uma leve queda de $\delta^{18}\text{O}$ e CE, e um fraco aumento da concentração de Cl^- , isto com um pequeno acréscimo do volume do reservatório no início das chuvas, seguido por um aumento de $\delta^{18}\text{O}$ entre julho e outubro de 2011, ou seja, durante o período de estiagem.

Mesmo com o volume de chuva diminuindo em maio de 2011, o açude continuou a aumentar seu volume, e mesmo tendo uma leve queda de volume durante o período seco, ainda assim era maior que a quantidade do período chuvoso, no entanto os valores de $\delta^{18}\text{O}$ aumentaram (abril a outubro de 2011). Este evento ocorre devido à evaporação sofrida pelas águas dos rios Quixeramobim e Banabuiú ao longo da sua trajetória até chegarem ao açude Banabuiú.

Comportamento diferente foi observado por Santiago (1984) no açude Pereira de Miranda, onde se observou aumento de oxigênio-18 com diminuição de volume, durante período seco e, redução brusca na concentração de oxigênio-18 com o aumento do volume entre os meses de fevereiro e abril de 1980 e, de março a abril de 1981.

Tendo em vista que os elementos analisados para a coluna d'água não demonstraram uma nítida modificação na concentração em função da profundidade, considerou-se que o mesmo compreende um reservatório bem misturado, logo, foi realizado o cálculo de mistura ponderada das águas e determinado os valores de CE, Cl^- e $\delta^{18}\text{O}$ para a água de recarga do período de julho de 2010 a abril de 2012, para se avaliar a hipótese da ocorrência de não estratificação do mesmo.

O cálculo foi realizado através da equação $C_r = (C_f \cdot V_f - C_i \cdot V_i) / V_r$, usando C_r para concentração respectivamente de Cl^- , sais totais (CE) e ^{18}O e, V_r , volume da recarga; C_i e

V_i , a concentração e volume inicial do reservatório e C_f e V_f , concentração e volume do reservatório após a recarga.

Os valores iniciais (para julho de 2010) e finais (para abril de 2012) utilizados nos cálculos para o AB01 foram: $V_i = 1.195,72 \text{ hm}^3$, $CE_i = 377 \text{ } \mu\text{S.cm}^{-1}$, $Cl_i = 50 \text{ mg.L}^{-1}$ e $\delta^{18}\text{O}_i = +0,27 \text{ ‰}$ e $V_f = 1.200,32 \text{ hm}^3$, $CE_f = 346 \text{ } \mu\text{S.cm}^{-1}$, $Cl_f = 62 \text{ mg.L}^{-1}$ e $\delta^{18}\text{O}_f = +0,15 \text{ ‰}$. Assim, os valores encontrados para a recarga, sob o pressuposto de águas bem misturadas, para o AB01 foram de $-7.712 \text{ } \mu\text{S.cm}^{-1}$, $3.181,3 \text{ mg.L}^{-1}$ e $-31,04 \text{ ‰}$ para CE_r , Cl_r e $\delta^{18}\text{O}_r$, respectivamente.

O valor negativo observado nos cálculos de mistura para CE não existe, o valor elevado de Cl nesta magnitude para a água do açude, e o valor negativo de $\delta^{18}\text{O}$ nesta dimensão, é impossível ocorrer na região estudada. Logo, consegue-se concluir que o pressuposto de um reservatório homogêneo é falso. Então, baseando-se nos cálculos anteriormente realizados o açude Banabuiú apresenta-se estratificado no período estudado.

5.10.3 Águas dos Rios Quixeramobim e Banabuiú

Os rios Banabuiú e Quixeramobim apresentaram águas mais enriquecidas em ^{18}O e D, média geral de 0,86 e -0,14 ‰, respectivamente (Tabelas 101 e 102), do que as águas do aquífero cristalino e dos aquíferos aluvionares. Em águas superficiais, devido à diferença nas massas das moléculas H_2^{16}O , H_2^{18}O e HD^{16}O , a evaporação leva a mudanças na composição isotópica da água remanescente, ficando mais enriquecida nas espécies pesadas, sendo, portanto sazonalmente marcada por um aumento na razão isotópica $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ e $^2\text{H}/^1\text{H}$. Poços que captam nas imediações de corpos d'água superficiais e mostram as mesmas modificações sazonais na composição isotópica de suas águas podem, assim, revelar a conexão entre águas superficiais e subterrâneas.

Tabela 101 – Valores de $\delta^{18}\text{O}$ (‰) e δD (‰) das águas dos rios Banabuiú e Quixeramobim, no período estudado.

Amostras	jul/10		out/10		jan/11		abr/11	
	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)
RB01	1,66	0,73	2,11	5,79	0,15	-3,41	-4,76	-33,05
RB02	NC	NC	0,74	-2,32	1,25	0,20	0,67	-2,14
RB03	0,46	-5,53	0,61	-2,28	0,90	-0,59	1,29	-0,44
RB04	0,78	-5,05	0,53	-2,47	0,14	-2,14	1,35	-0,14
RB05	1,00	-3,30	0,55	-1,88	0,73	-0,78	-0,43	-9,30
RB06	1,12	-2,64	0,60	-1,74	0,09	-2,56	-1,36	-13,29
RQ01	3,56	8,52	4,76	17,74	2,35	7,80	-1,40	-12,18
RQ02	1,30	-2,21	1,13	0,36	1,95	6,19	1,51	0,74

Amostras	jul/11		out/11		jan/12		abr/12	
	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)
RB01	1,51	-2,80	1,06	0,67	0,25	5,33	0,77	3,92
RB02	1,05	-1,01	1,05	0,64	NC	NC	NC	NC
RB03	0,36	-1,93	1,05	-0,03	-0,50	-0,40	-0,16	1,90
RB04	0,20	-3,00	1,04	1,22	-0,78	-1,12	-0,19	0,46
RB05	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
RB06	1,09	0,15	1,04	1,01	-0,13	1,72	0,17	0,45
RQ01	1,04	1,15	4,55	13,23	3,62	20,57	2,54	15,73
RQ02	1,07	1,00	1,10	3,47	NC	NC	0,69	5,67

Fonte: O autor.

Tabela 102 – Valores das médias de $\delta^{18}\text{O}$ (‰) e δD (‰) das águas dos rios Banabuiú e Quixeramobim, no período estudado.

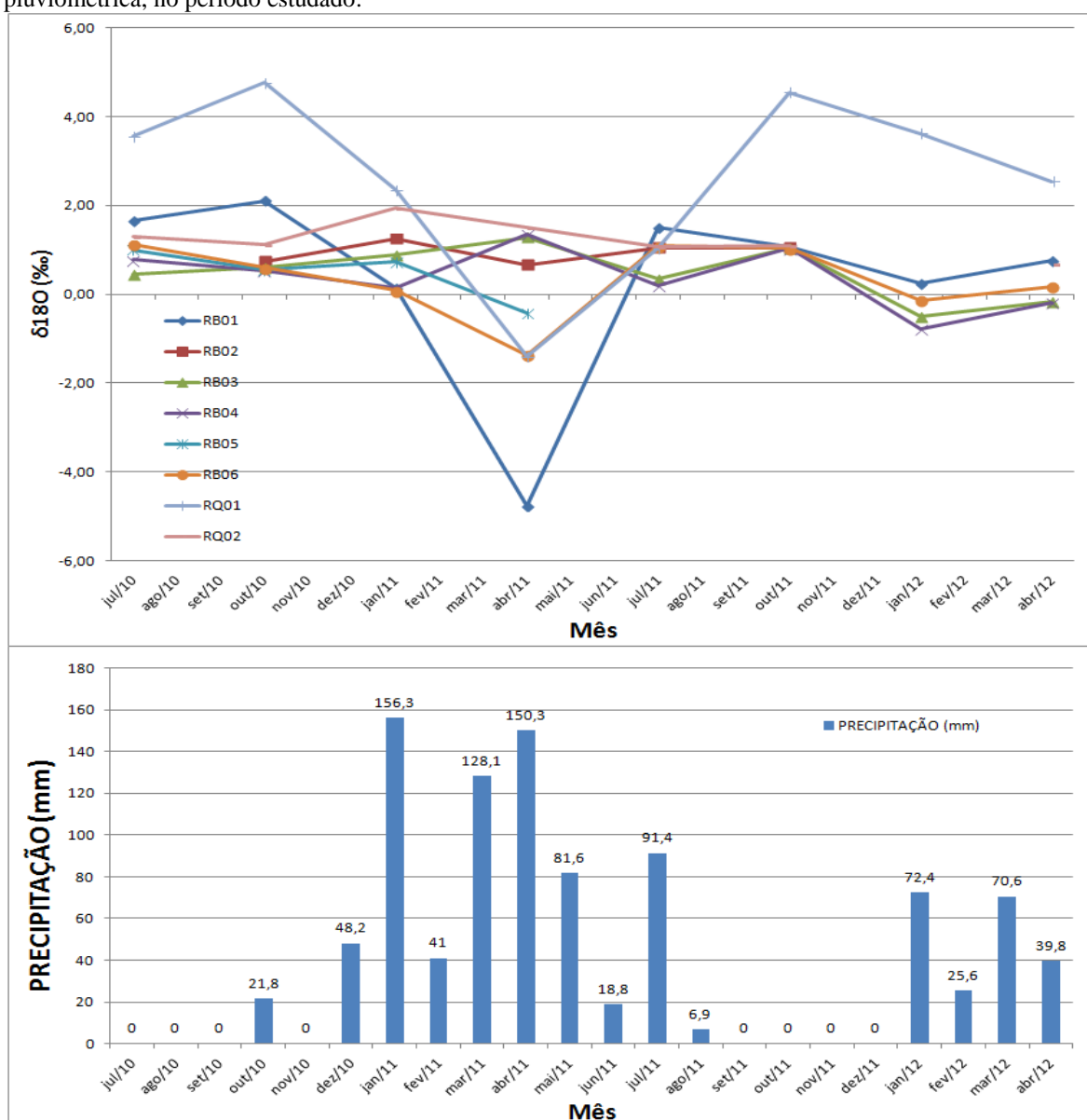
AMOSTRAS\MÉDIA	MÉDIA DO PERÍODO DE CHUVA		MÉDIA DO PERÍODO DE ESTIAGEM		MÉDIA GERAL	
	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)
RB01	-0,90	-6,80	1,58	1,10	0,34	-2,85
RB02	0,96	-0,97	0,95	-0,90	0,95	-0,93
RB03	0,38	0,12	0,62	-2,44	0,50	-1,16
RB04	0,13	-0,73	0,64	-2,33	0,38	-1,53
RB05	0,15	-5,04	0,77	-2,59	0,46	-3,81
RB06	-0,31	-3,42	0,96	-0,80	0,33	-2,11
MÉDIA RIO BANABUIÚ	0,07	-2,81	0,92	-1,33	0,49	-2,07
RQ01	1,78	7,98	3,48	10,16	2,63	9,07
RQ02	1,38	4,20	1,15	0,66	1,25	2,18
MÉDIA RIO QUIXERAMOBIM	1,58	6,09	2,31	5,41	1,94	5,62
MÉDIA GERAL	0,45	-0,58	1,27	0,36	0,86	-0,14

Fonte: O autor.

Variação Sazonal

Os menores valores de $\delta^{18}\text{O}$ foram observados sempre nos meses de maior pluviosidade, sendo os menores valores verificados em abril de 2011 (RB01 e RQ01). As águas dos rios Quixeramobim e Banabuiú tornaram-se enriquecidas em ^{18}O nos meses secos, de elevada evaporação (Gráfico 33).

Gráfico 33 – Variação sazonal de $\delta^{18}\text{O}$ (‰) das águas dos rios Banabuiú e Quixeramobim, e precipitação pluviométrica, no período estudado.



Fonte: O autor.

Fonte da Precipitação: FUNCEME (2013).

A variação sazonal na composição isotópica da água dos rios Banabuiú e Quixeramobim sugere que estes rios não recebem contribuição significativa de águas subterrâneas, as quais são, na sua maioria, isotopicamente mais leves, refletindo a composição da precipitação.

Variação Espacial

Seguindo a direção dos fluxos, do ponto RB01 para o ponto RB06 (para o rio Banabuiú), e do ponto RQ01 para o ponto RQ02 (para o rio Quixeramobim), as concentrações de ^{18}O diminuíram no mês de abril de 2011. Distância de RB01 até RB06 é em torno de 90 km, e a distância de RQ01 até RQ02 é em torno de 10 km.

Nos meses chuvosos a diminuição de valores de ^{18}O , ao longo dos rios, certamente, é resultado de um maior aporte de água pluvial ao longo do rio, como verificado para os trechos, nos meses chuvosos de janeiro de 2011, janeiro e abril de 2012.

O contínuo decréscimo na composição de ^{18}O ao longo da direção do fluxo dos rios Banabuiú e Quixeramobim, hipoteticamente, indica que este rio no decorrer do seu fluxo é levemente alimentado por águas novas de riachos adjacentes.

Gomes (2005) e Moura (2008) perceberam que ao longo da direção do fluxo dos rios Jaguaribe e Banabuiú, respectivamente, existe um aumento contínuo na composição de ^{18}O , então, concluíram que os rios não eram alimentados pelas águas subterrâneas, ao contrário deste trabalho, isto ocorreu devido ao alto grau de evaporação daquelas regiões.

5.10.4 Águas dos Poços do Domínio Hidrogeológico Cristalino

Os poços do domínio hidrogeológico cristalino possuem uma profundidade que varia de 60 (PC01 e PC04) a 78 metros (PC03 e PC05), e apresentaram valores de $\delta^{18}\text{O}$ e δD (Tabelas 103 e 104), com média geral de -1,95 ‰ e -13,77 ‰, respectivamente. Estes valores de $\delta^{18}\text{O}$ (‰) e δD (‰) expressam que estas águas não sofreram evaporação, caracterizando, portanto recarga apenas por águas meteóricas (Gráfico 34).

Tabela 103 – Valores de $\delta^{18}\text{O}$ (‰) e δD (‰) das águas dos poços do domínio hidrogeológico cristalino, no período estudado.

Amostras	jul/10		out/10		jan/11		abr/11	
	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)
PC01	-1,90	-19,36	-3,00	-20,61	-2,01	-15,01	NC	NC
PC02	NC	NC	-1,93	-11,18	-2,49	-13,24	NC	NC
PC03	NC	NC	-2,69	-19,18	NC	NC	-2,58	-19,05
PC04	NC	NC	0,38	-2,33	0,56	-3,80	0,25	-3,41
PC05	NC	NC	-1,93	-13,93	-1,39	-11,51	-2,30	-15,74
PC06	NC	NC	-3,42	-20,66	NC	NC	NC	NC

Amostras	jul/10		out/10		jan/12		abr/12	
	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)
PC01	-2,41	-17,93	-2,34	-18,75	-2,65	-16,93	-2,72	-17,14
PC02	-1,92	-9,81	-2,68	-12,46	NC	NC	-2,70	-10,20
PC03	-2,77	-22,14	-2,94	-20,46	NC	NC	-3,26	-18,33
PC04	NC	NC	-2,21	-14,16	NC	NC	NC	NC
PC05	5,93	-12,51	NC	NC	NC	NC	NC	NC
PC06	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC

Fonte: O autor.

NC: Não Coletado.

Tabela 104 – Valores das médias de $\delta^{18}\text{O}$ (‰) e δD (‰) das águas dos poços do domínio hidrogeológico cristalino, no período estudado.

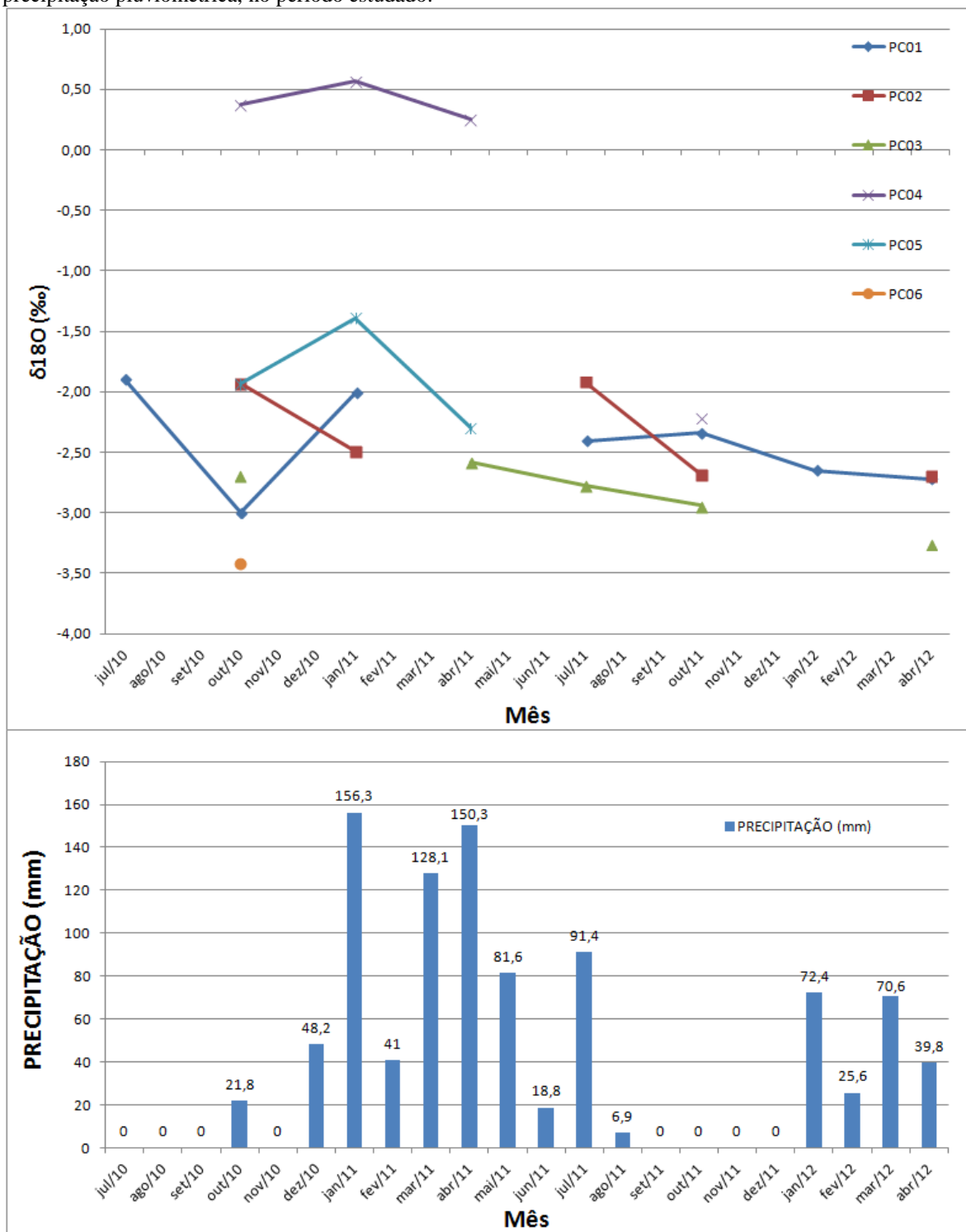
AMOSTRAS\MÉDIA	MÉDIA DO PERÍODO DE CHUVA		MÉDIA DO PERÍODO DE ESTIAGEM		MÉDIA GERAL	
	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)
PC01	-2,46	-16,36	-2,41	-19,16	-2,43	-17,96
PC02	-2,59	-11,72	-2,18	-11,15	-2,34	-11,38
PC03	-2,92	-18,69	-2,80	-20,60	-2,85	-20,03
PC04	0,41	-3,61	-0,92	-8,25	-0,26	-6,76
PC05	-1,84	-13,62	SM	SM	-1,87	-12,72
PC06	SM	SM	SM	SM	SM	SM
MÉDIA	-1,88	-12,80	-2,08	-14,79	-1,95	-13,77

Fonte: O autor.

NC: Não Coletado.

SM: Sem Média.

Gráfico 34 – Variação sazonal de $\delta^{18}\text{O}$ (‰) das águas dos poços do domínio hidrogeológico cristalino, e precipitação pluviométrica, no período estudado.



Fonte: O autor.

Fonte da Precipitação: FUNCEME (2013).

Frischkorn *et al* (1989), estudando a composição isotópica de poços no domínio hidrogeológico cristalino, no Estado do Ceará, verificaram que nos poços mais próximos da costa o valor médio foi $-2,72 \pm 0,26$ ‰ e os poços mais para o interior o valor médio foi menor, $-3,29 \pm 0,19$ ‰, considerando, portanto, o efeito continental, que, por conseguinte indica não haver evaporação significativa antes da infiltração para as fraturas, ou seja, o aquífero cristalino é rapidamente alimentado pelas águas da chuva.

Dos 06 pontos amostrados (com dados de $\delta^{18}\text{O}$ e δD) no domínio hidrogeológico cristalino, os poços PC05 e PC06 apresentaram problemas de amostragem, pois em julho de 2011, o poço PC05 encontrava-se seco apenas com água no reservatório de distribuição (água parada sem renovação e sob evaporação), logo os resultados para $\delta^{18}\text{O}$ e δD aumentaram sob o efeito da evaporação chegando aos valores de $+5,93$ ‰ e $-12,51$ ‰, respectivamente; já o poço PC06 ficou quebrado durante todo o resto do período de amostragem, portanto, estes problemas impossibilitaram o cálculo de média para o PC06, e o valor discrepante do poço PC05 foi retirado do cálculo das médias que envolviam aquele período.

As médias de valores dos poços PC01, PC02, PC03 e PC05 deste domínio se apresentaram em torno do valor médio da chuva da região para o período estudado ($\delta^{18}\text{O} = -2,63$ ‰ e $\delta\text{D} = -11,67$ ‰, médias ponderadas), o que ratifica a hipótese que no domínio hidrogeológico cristalino a recarga direta é rápida, sem evaporação em superfície, e no caso destes pontos de amostragem, não há influência das águas superficiais; esta existe no PC04, pois a influência tende a aumentar os valores neste domínio, devido à mistura com águas dos rios, os quais possuem um valor médio de $\delta^{18}\text{O} = 0,86$ ‰ e $\delta\text{D} = -0,14$ ‰.

5.10.5 Águas dos Poços dos Aquíferos Aluvionares

Os aquíferos aluvionares do rio Banabuiú apresentaram uma variação espacial ainda mais ampla. A distribuição ficou entre $-3,86$ a $+7,20$ ‰ (Tabelas 105 e 106). Estas amplas distribuições sugerem que as águas de aquíferos aluvionares são misturadas, em proporções variadas, de água de diferentes fontes, verificando-se um padrão para os aluviões (Gráfico 35).

Tabela 105 – Valores de $\delta^{18}\text{O}$ (‰) e δD (‰) das águas dos poços dos aquíferos aluvionares, no período estudado.

Amostras	jul/10		out/10		jan/11		abr/11	
	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)
PA01	5,33	20,85	6,52	28,47	7,20	31,07	NC	NC
PA02	1,60	0,02	2,03	5,15	3,07	8,57	NC	NC
PA03	NC	NC	-0,49	-9,54	-1,48	-12,12	-3,86	-28,23
PA04	NC	NC	-0,63	-9,47	-0,99	-10,29	0,02	-5,59

Amostras	jul/10		out/10		jan/12		abr/12	
	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)
PA01	1,77	10,04	6,24	16,07	4,36	24,51	5,09	25,84
PA02	NC	NC	1,10	0,61	-0,82	0,33	NC	NC
PA03	2,88	-5,33	-1,05	-9,03	-1,75	-11,29	NC	NC
PA04	1,34	-2,66	1,79	-4,39	-1,57	-7,33	-0,59	-4,36

Fonte: O autor.

NC: Não Coletado.

Tabela 106 – Valores das médias de $\delta^{18}\text{O}$ (‰) e δD (‰) das águas dos poços dos aquíferos aluvionares, no período estudado.

AMOSTRAS\MÉDIA	MÉDIA DO PERÍODO DE CHUVA		MÉDIA DO PERÍODO DE ESTIAGEM		MÉDIA GERAL	
	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)
PA01	*5,55	*27,14	*4,96	*18,86	*5,21	*22,41
PA02	1,12	4,45	1,58	1,93	1,40	2,94
PA03	-2,36	-17,21	0,45	-7,96	-0,96	-9,46
PA04	-0,78	-6,89	0,83	-5,51	-0,09	-6,42
MÉDIA	-0,67	-6,55	0,95	-3,85	0,12	-4,31

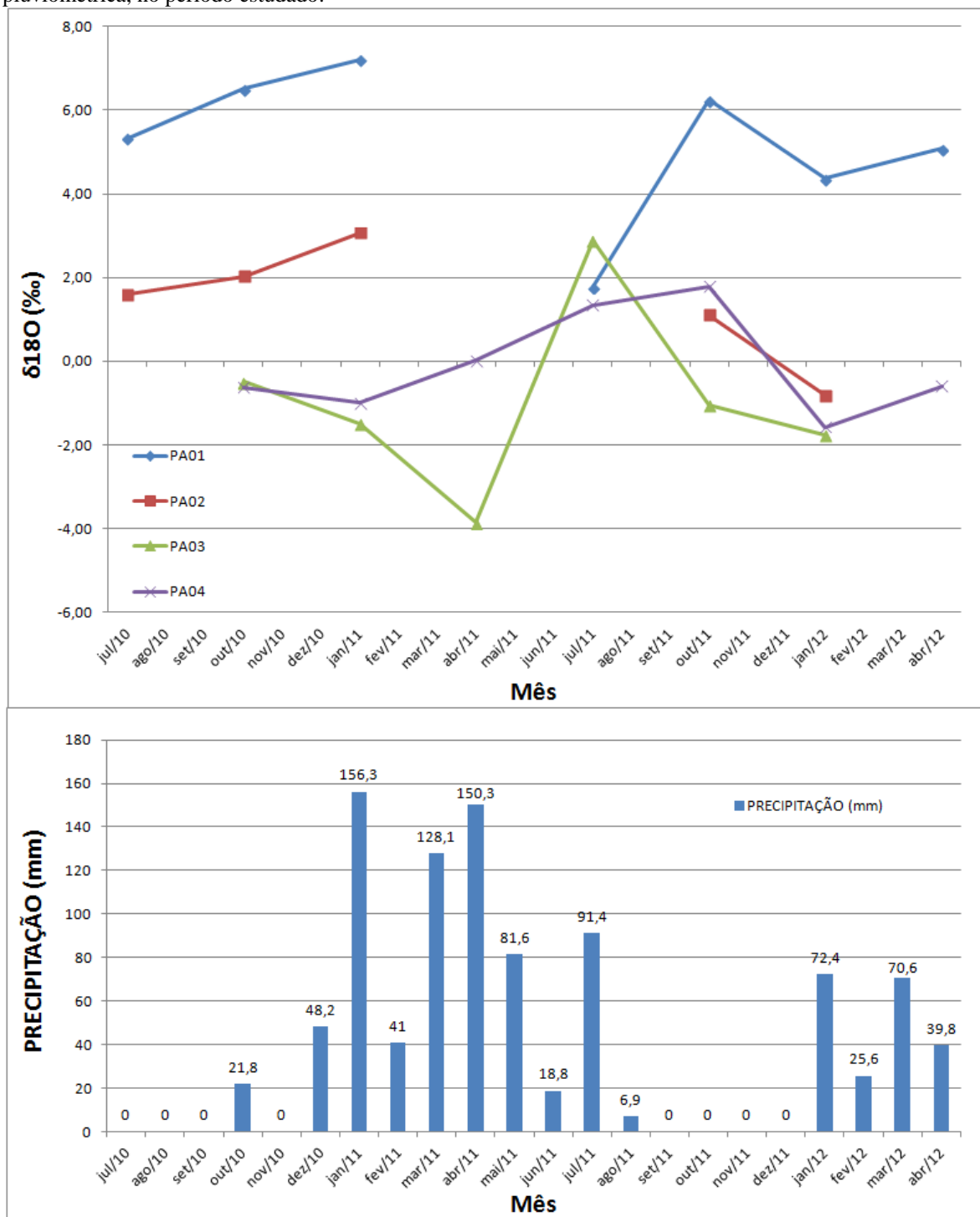
Fonte: O autor.

NC: Não Coletado.

SM: Sem Média.

*Este valor não entrou na média por ser muito discrepante.

Gráfico 35 – Variação sazonal de $\delta^{18}\text{O}$ (‰) das águas dos poços dos aquíferos aluvionares, e precipitação pluviométrica, no período estudado.



Fonte: O autor.

Fonte da Precipitação: FUNCEME (2013).

Os aquíferos aluvionares apresentaram uma concentração média de $\delta^{18}\text{O}$ e δD de +0,12 ‰ e -4,31 ‰, respectivamente. Todos os poços mostram uma variação significativa do $\delta^{18}\text{O}$ (‰) ao longo do ano; em época de chuva a concentração tende a ser menor, depois aumenta devido à mistura das águas. Estas variações na concentração de ^{18}O mostram que os aquíferos respondem rapidamente às mudanças sazonais (outubro de 2011 para janeiro de 2012), indicando uma recarga rápida e fácil.

O ponto de amostragem PA01 é um poço amazonas, que se encontrou mal lacrado e com nível estático aflorante durante todo período estudado. Como não possui uma estrutura de proteção (casa do poço), sempre apresentou valores elevados de $\delta^{18}\text{O}$ (média de +5,21 ‰), totalmente fora dos padrões até mesmo para as águas dos rios e do açude.

O poço PA02 inicialmente (julho de 2010 a janeiro de 2011) recebe evaporação pontual, pois a água ficando estagnada muito tempo num determinado reservatório eleva os valores de $\delta^{18}\text{O}$ ‰, sofrendo assim o efeito da evaporação, contudo, em janeiro de 2012 seu valor se torna baixo, recebendo assim contribuição da água da chuva.

Os poços PA03 e PA04 apresentam concentrações características de águas misturadas, formadas por água de origem pluvial e fluvial, havendo dominância em determinados meses de apenas uma fonte de recarga. O poço PA04 é o que recebe maior alimentação pelo rio, visto que seus valores de $\delta^{18}\text{O}$ e δD (média de -0,09 ‰ e -6,30 ‰) estão sempre entre o valor médio do rio Banabuiú ($\delta^{18}\text{O} = +0,49$ ‰ e $\delta\text{D} = -2,07$ ‰) e o valor médio ponderado da água da chuva ($\delta^{18}\text{O} = -2,63$ ‰ e $\delta\text{D} = -11,67$ ‰).

Para os poços PA03 e PA04, nos meses chuvosos, os valores de $\delta^{18}\text{O}$ (‰) tornam-se ainda menores (Gráfico 35), chegando a -3,86 ‰ (abril de 2011) e -1,57 ‰ (janeiro de 2012), respectivamente. Isto indica uma alimentação pelas chuvas fortes, principalmente nos meses de janeiro e abril de 2011, que tiveram as maiores precipitações pluviométricas das coletas (efeito quantidade).

Santiago *et al.* (2007) apresentaram para 06 poços da Bacia Sedimentar de Lavras da Mangabeira uma relação linear entre $\delta^{18}\text{O}$ e δD , expressa pela Equação 23:

$$\delta\text{D} (\text{‰}) = 4,80 \delta^{18}\text{O} \text{‰} - 2,60 \text{‰} \quad (23)$$

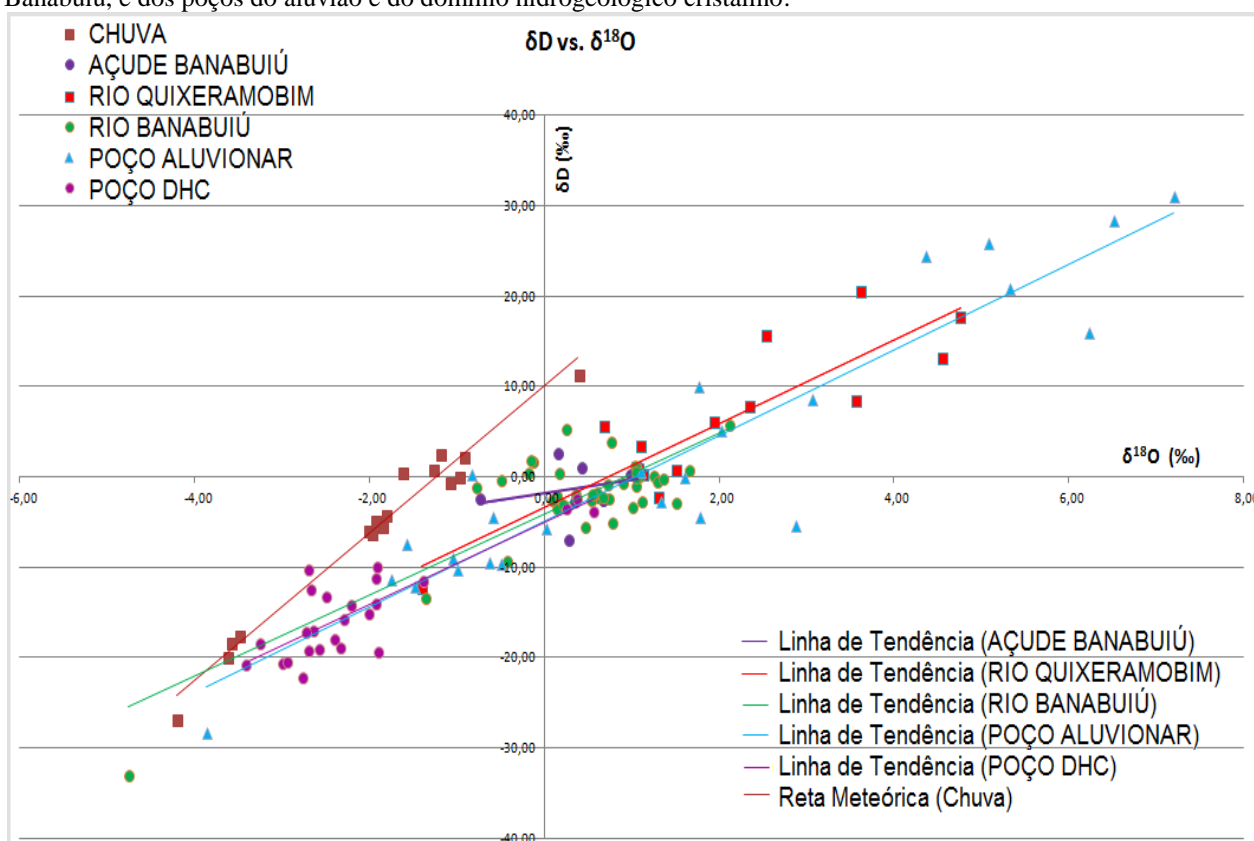
Já para a região de Banabuiú, encontrou-se uma relação entre $\delta^{18}\text{O}$ e δD expressa pela Equação 24:

$$\delta\text{D} (\text{‰}) = 4,73 \delta^{18}\text{O} \text{‰} - 4,94 \text{‰} \quad (24)$$

Estes coeficientes angulares enfatizam que as águas subterrâneas dos aluviões são derivadas de águas superficiais expostas em clima árido.

Nota-se então que a região estudada apresentou uma relação de dados isotópicos bem coerentes, isto se pode perceber no Gráfico 36 a seguir, onde a linha de tendência da chuva (água não evaporada) surge no “topo” com maior declividade e menores valores dos isótopos; as linhas de tendência dos poços aluvionares (águas evaporada e não evaporada) e do domínio hidrogeológico cristalino (água não evaporada) aparecem na “base” com valores e declividades inferiores, e as linhas de tendência dos rios e açude (águas evaporadas) se apresentam entre a base e o topo, na região intermediária.

Gráfico 36 $-\delta^{18}\text{O}$ (‰) versus δD (‰) das águas da chuva, do açude Banabuiú, dos rios Quixeramobim e Banabuiú, e dos poços do aluvião e do domínio hidrogeológico cristalino.



Fonte: O autor.

Poço DHC: Poço do domínio hidrogeológico cristalino.

5.11 Estratificação – Dinâmica Isotópica da Água do Açude Banabuiú

Os resultados de Oxigênio-18 e Deutério da coluna d'água do açude Banabuiú estão apresentados na Tabela 107 e nos Gráficos 37 e 38. Nota-se que no período de chuva

ocorre uma leve estratificação no açude nos valores de $\delta^{18}\text{O}$ (‰) e δD (‰), já no período de estiagem, estes valores se misturam nos gráficos, sem nenhum padrão de ordem.

Como foi visto na Tabela 08 (velocidade média dos ventos), verificou-se que no período de estiagem, agosto a dezembro, a velocidade dos ventos em ms^{-1} (média mensal) é maior que no período chuvoso, e esta ação sazonal dos ventos é mais um fator importante que colabora com a estratificação do reservatório no período de chuva e desestratificação no período de estiagem; pois devido a sua velocidade, constância e intensidade no período de estiagem, a camada d'água superficial do açude Banabuiú foi deslocada para o fundo do reservatório, e a água que estava no fundo foi à superfície (por diferença de densidade) fazendo assim um ciclo de mistura, portanto, toda esta interação do vento com o reservatório influenciou na qualidade da estratificação da lâmina d'água do açude Banabuiú.

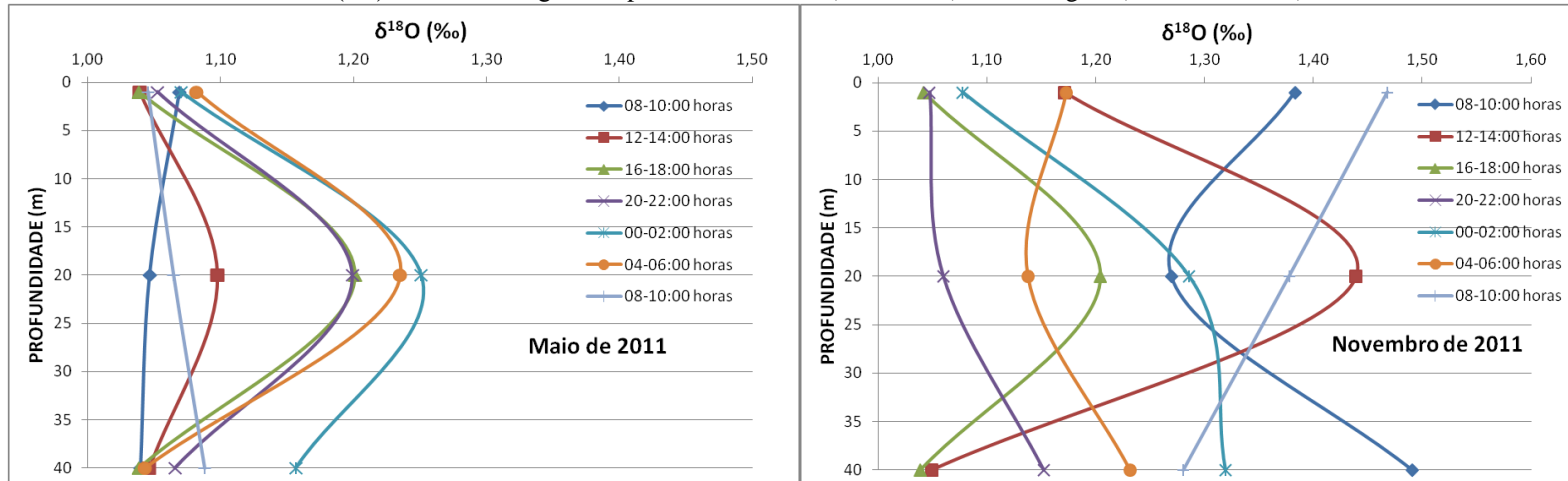
Estes resultados corroboram com o modelo de estratificação do açude Banabuiú no período chuvoso, e desestratificação no período de estiagem.

Tabela 107 – Valores de $\delta^{18}\text{O}$ (‰) e δD (‰) da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e estiagem (novembro/2011).

$\delta^{18}\text{O}$ (‰) MAIO DE 2011				$\delta^{18}\text{O}$ (‰) NOVEMBRO DE 2011			
HORA	01 metro	20 metros	40 metros	HORA	01 metro	20 metros	40 metros
08-10:00 horas	1,07	1,05	1,04	08-10:00 horas	1,38	1,27	1,49
12-14:00 horas	1,04	1,10	1,05	12-14:00 horas	1,17	1,44	1,05
16-18:00 horas	1,04	1,20	1,04	16-18:00 horas	1,04	1,20	1,04
20-22:00 horas	1,05	1,20	1,07	20-22:00 horas	1,05	1,06	1,15
00-02:00 horas	1,07	1,25	1,16	00-02:00 horas	1,08	1,29	1,32
04-06:00 horas	1,08	1,24	1,04	04-06:00 horas	1,17	1,14	1,23
08-10:00 horas	1,05	1,06	1,09	08-10:00 horas	1,47	1,38	1,28
MÉDIA	1,06	1,16	1,07	MÉDIA	1,19	1,25	1,22
δD (‰) MAIO DE 2011				δD (‰) NOVEMBRO DE 2011			
08-10:00 horas	0,57	-2,20	-1,64	08-10:00 horas	-2,15	-1,72	-0,88
12-14:00 horas	0,30	-1,73	-0,54	12-14:00 horas	-0,52	-1,25	-0,94
16-18:00 horas	1,18	-1,06	0,99	16-18:00 horas	-0,97	-1,03	-2,56
20-22:00 horas	-0,03	-2,49	-0,29	20-22:00 horas	-1,33	-1,57	-1,20
00-02:00 horas	-0,81	-2,43	-0,95	00-02:00 horas	-0,88	-1,45	-1,61
04-06:00 horas	0,44	-2,17	-0,56	04-06:00 horas	-0,68	-2,49	-2,06
08-10:00 horas	-0,92	-2,59	-1,09	08-10:00 horas	-0,86	-0,77	-1,13
MÉDIA	0,10	-2,10	-0,58	MÉDIA	-1,05	-1,47	-1,48

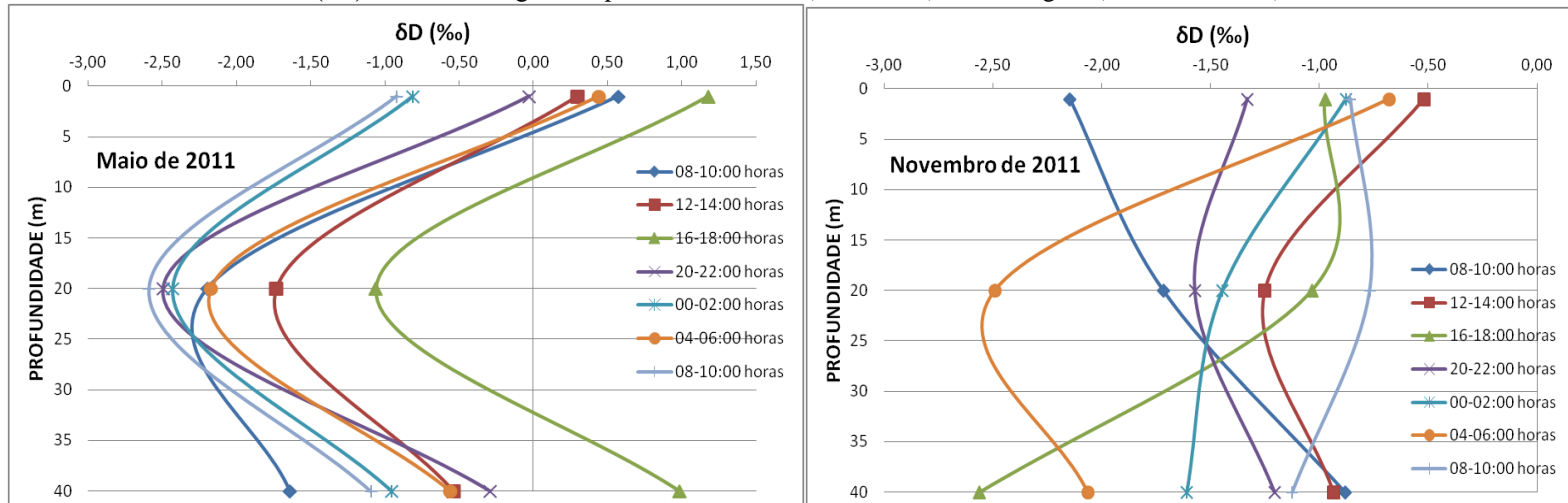
Fonte: O autor.

Gráfico 37 – Valores de $\delta^{18}\text{O}$ (‰) da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e de estiagem (novembro/2011).



Fonte: O autor.

Gráfico 38 – Valores de δD (‰) da coluna d'água nos períodos de chuva (maio/2011) e de estiagem (novembro/2011).



Fonte: O autor.

6 CONCLUSÕES

Através dos resultados obtidos do estudo da Bacia Hidrográfica do Rio Banabuiú, no trecho entre Quixeramobim e Banabuiú, pode-se concluir que:

a) Durante todo o ano hidrológico, a superfície freática acompanha o relevo. O fluxo subterrâneo dirige-se basicamente para Nordeste e Leste, mesma direção dos rios Quixeramobim e Banabuiú. Ao longo do trecho do rio Banabuiú, aparecem fracas zonas de convergência.

b) As sondagens elétricas verticais foram eficientes na estimativa das espessuras das unidades geológicas da área, mostrando que a espessura média (7,08 m) dos depósitos aluvionares é pequena em relação ao PIMN (por volta de 20 %).

c) A reserva renovável para o ano de 2009 foi de $6,9 \times 10^6$ m³/ano ($2,2 \times 10^3$ L/d por pessoa) para os aquíferos aluvionares, enquanto que os outros anos (2010-2012) aqui estudados não tiveram infiltração. Este valor corresponde a 21,6 % do volume de chuva que caiu sobre a área estudada no ano de 2009. Logo, pegou-se o resultado do ano de 2009 e fez-se uma média para os 04 anos estudados, o qual gerou uma demanda de 552 L/d por pessoa, ou seja, baseado nos 04 anos estudados, hipoteticamente tem-se para a região estudada uma quantidade suficiente de água para consumo e higiene da população local. A reserva permanente é de aproximadamente $34,8 \times 10^6$ m³.

d) Observando-se o valor baixo da reserva renovável e a pequena oscilação dos níveis estáticos dos poços dos aluviões, percebe-se que o rio mantém o nível freático, por isto a flutuação é mínima, portanto o aquífero aluvionar em termos hidráulicos está condicionado aos rios. O ¹⁸O dos aluviões indica exatamente isto.

e) Mesmo os parâmetros das águas superficiais possuindo uma classificação individual ruim em pelo menos um parâmetro do IQA, as águas superficiais foram classificadas como boas. No entanto, avaliando individualmente os parâmetros do IQA, os íons maiores, os metais pesados e os coliformes, chega-se a conclusão que os principais problemas para o consumo humano das águas superficiais (brutas) são os coliformes totais, o elemento ferro, o manganês, o alumínio e a turbidez; estes se encontram com valores acima do permitido pela Portaria nº 2914 do Ministério da Saúde. Portanto, estas águas só podem ser consumidas após o devido tratamento. E para o uso na irrigação, as águas do açude Banabuiú

e do rio Banabuiú podem ser utilizadas sem muitos problemas, já a água do rio Quixeramobim é considerada salobra, não tão boa para a irrigação.

f) Avaliando os íons maiores com os metais pesados para as águas do domínio hidrogeológico cristalino, chega-se a conclusão que os principais problemas para o consumo humano destas águas são a elevada salinidade (cloreto, sódio etc.), o nitrato, o ferro, o alumínio e o manganês, estes se encontram com valores acima do permitido pela Portaria nº 2914 do Ministério da Saúde. Seu uso para abastecimento doméstico só pode ocorrer após o devido tratamento. E para o uso na irrigação, as águas deste domínio não podem ser utilizadas com descontrole, ou seja, requerem uma prática de irrigação controlada.

g) Avaliando os íons maiores com os metais pesados para as águas do aquífero aluvionar, chega-se a conclusão que os principais problemas nos pontos de amostragem PA01, PA02 e PA04 para o consumo humano destas águas são o ferro e o manganês, estes se encontram com valores acima do permitido pela Portaria nº 2914 do Ministério da Saúde. No caso do PA03, este ponto se mostrou com elevadas quantidades de sais, ferro, alumínio e manganês, características estas, parecidas com os poços do domínio hidrogeológico cristalino. O uso para abastecimento doméstico só pode ocorrer após o devido tratamento. E para o uso na irrigação, as águas destes aluviões, dos pontos PA01, PA02 e PA04, podem ser utilizadas em quase todos os tipos de solo.

h) A reta meteórica para os isótopos estáveis para a região estudada apresentou uma forte semelhança com a reta meteórica mundial. Isto é surpreendente, pois em regiões secas encontra-se normalmente uma inclinação menor da reta.

i) Segundo os resultados de ^{18}O e D, os rios não recebem contribuição significativa de águas subterrâneas, pelo contrário, os aquíferos aluvionares recebem alimentação pelos rios Quixeramobim e Banabuiú. Os coeficientes angulares da correlação linear entre deutério e oxigênio-18 enfatizam que as águas subterrâneas dos aluviões são derivadas de águas superficiais expostas à evaporação em clima árido. Correlacionando os dados investigados neste estudo, conclui-se que o aluvião é perenizado pelos rios.

j) As águas dos poços do domínio hidrogeológico cristalino não sofreram evaporação, caracterizando, portanto, recarga apenas por águas meteóricas. As médias isotópicas deste domínio ficaram em torno do valor médio da chuva da região, ratificando a hipótese que no domínio hidrogeológico cristalino a recarga direta é rápida.

k) No açude Banabuiú ocorre uma estratificação (térmica e química) no período chuvoso e uma desestratificação no período de estiagem. Esta estratificação acontece devido à chegada do período chuvoso, pois a chuva com uma temperatura menor (densidade maior) carrega os elementos químicos (através do escoamento dos solos) para o hipolímnio do açude Banabuiú; a influência da luz com a profundidade ajuda a manter a estratificação; juntamente com a falta de ação dos ventos no período chuvoso, ocasionando uma não mistura do reservatório; e também devido ao influxo das águas dos rios Quixeramobim e Banabuiú, estes aportam no açude Banabuiú com temperatura, densidade e química diferentes, ocasionando assim um aumento dos nutrientes e salinidade no fundo do açude, ou seja, uma estratificação laminar que vai da superfície (epilímnio) à profundidade (hipolímnio).

REFERÊNCIAS

- AB'SABER, Aziz Nacib. **Os Domínios de Natureza no Brasil**. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003.
- ALVAREZ, R.H., NIEDZIELSKI, H., 1996. **Estimacion de la recarga en La subcuena Rio de las avenidas Pachuca Hidalgo México**. In: Congresso Latinoamericano de Hid. Sub., 3, México, Anais do 3º Congresso Latino-americano de Hid. Sub., México: ALHSUD. p. 35-46. 1996.
- ANA, 2012. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/GestaoRecHidricos/UsosMultiplos/BoletinsMonitorament oAnteriores.asp>>. Acesso em 13 de Ago. 2012.
- ANA. **Inventário das estações pluviométricas**. Agência Nacional de Águas. – 2 ed. - Brasília: ANA; SGH, 2009.
- ANDRADE, E. M. de; PEREIRA O. J.; DANTAS F. E. R. **Semiárido e manejo dos recursos naturais: uma proposta de uso adequado do capital natural**. Editora Universidade Federal do Ceará. 2010.
- APHA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 20th edn. Edited by L. S. Clesceri, A. E. Greenberg & A. D. Eaton. Washington DC: American Public Health Association. 2001.
- BAIRD, C. **Química Ambiental**. 2a ed. Bookman. Tradução de Maria Angeles Recio e Luiz Carlos Carrera. Porto Alegre. 622p. 2002.
- BAIRD, C. **Química Ambiental**. 4a ed. Bookman. Tradução Marco Tadeu Grassi *et al.*. Porto Alegre. 844p. 2011.
- BRAGA, A.C.O. **Métodos Geométricos Aplicados**. Universidade Estadual Paulista – UNESP/ Campus de Rio Claro. Instituto de Geociências e Ciências Exatas – IGCE/ Departamento de Geologia Aplicada – DGA. 2006.
- BURTE, J. D. P. **Os pequenos aquíferos aluviais nas áreas cristalinas semi-áridas: funcionamento e estratégias de gestão. Estudo de caso no Nordeste Brasileiro**. PhD Thesis, Universidade Federal do Ceará (Brasil)-Université Montpellier 2 (França). 2008.
- CASTANY, G. **Prospección y explotación de las aguas subterráneas**. Barcelona. Omega. 1975.
- CAVALCANTE, I. N. **Fundamentos Hidrogeológicos para a Gestão Integrada de Recursos Hídricos na Região Metropolitana de Fortaleza - Estado do Ceará**. Tese de Doutorado – IG/USP. 156p. 1998.
- CEARÁ. Assembleia Legislativa do Estado do Ceará. **Cenário atual dos recursos hídricos do Ceará**. Fortaleza: INESP, 2008.

CEARÁ. Assembleia Legislativa do Estado do Ceará. **Pacto das águas: caderno regional da sub-bacia do Banabuiú**. Fortaleza: INESP, 2009.

CEARÁ. Secretaria dos Recursos Hídricos. **Plano Estadual de Recursos Hídricos (Planerh)**. Fortaleza: SRH, 2005.

CETESB. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br>. Acesso em: 17 de Dezembro de 2012.

COGERH. Disponível em: <http://portal.cogerh.com.br/> Acesso em: 02 de Janeiro de 2013.

COGERH. **Plano de Gestão Participativa dos Aquíferos da Bacia Potiguar: Estado do Ceará**. Fortaleza: Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. 2009.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – CPRM / Serviço Geológico do Brasil. **Atlas dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Ceará – Programa de Recenseamento de Fontes de Abastecimento por Águas Subterrâneas do Ceará – diagnóstico Municipal de Limoeiro do Norte**. Fortaleza, 2003.

COSTA, W. D. **Avaliação das Reservas, Potencialidades e Disponibilidade de Aquíferos**. *ANAIS do 10º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*, p. 11, 1998.

CUSTODIO, E.; LLAMAS, M.R. **Hidrologia Subterranea**. 2a Ed. Omega, Tomo I e II, Barcelona, 2350 p. 1983.

DNPM. Disponível em: <http://sigmine.dnpm.gov.br/webmap/> Acesso em: 12 de Setembro de 2012

EDUCAR BRASIL. Disponível em: <http://www.educarbrasil.org.br/Portal.Base/Web>. Acesso em: 10 de Abril de 2010.

EILERS, V. H. M. **Estimativa de recarga de águas subterrâneas utilizando o método do balanço hídrico**. XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. 2004.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro. 306p. 2006.

ESTEVES, F. A. **Fundamentos de limnologia**. 3 ed. Rio de Janeiro: Interciência. 2011.

FEITOSA, F. A. C *et al.*, *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. 3 ed. Revisada e Ampliada: CPRM. Cap. 2, 4 e 5. 812p. 2008.

FEITOSA, F. A. C., MANOEL FILHO, J. **HIDROGEOLOGIA – Conceitos e Aplicações CPRM**. 2a. Ed. paginação irregular. 2000.

FENZL N. **Introdução à geoquímica**. Universidade Federal do Pará. 1986.

FETTER C. W. – **Applied Hydrogeology**. 3º Edition. Prentice Hall Publishing Co. New York, 691 p. 1994.

FIGUEIRÊDO, A .F. R. **Análise do risco de salinização dos solos da Bacia Hidrográfica do rio Colônia – Sul da Bahia.** Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Santa Cruz. Ilhéus, Bahia. 2005.

FOSTER, S. S. D. A. e HIRATA, R. C. A. **Groundwater pollution risk evaluation: the methodology using available.** Lima: CEPIS/PAHO/WHO. 78p. 1998.

FRAGOSO JUNIOR C. R.; MARQUES D. M.; FERREIRA T. F. **Modelagem ecológica em ecossistemas aquáticos.** Oficina de Textos. São Paulo. 2009.

FRISCHKORN, H.; SANTIAGO, M.M.F. ; SEREJO, A.N.C . **Isotope Study of Wells in Crystalline Rock of the Semi-Aride Northeast of Brazil. In: Agência Internacional de Energia Atômica. (Org.). Isotope Hydrology Investigations in Latin America.** Viena: IAEA. p. 73-90. 1989.

FRIZZO, S. J. **Elementos químicos em águas de abastecimento público no Estado do Ceará.** In: SILVA, C. R.; FIGUEIREDO, B. R.; CAPITANI, E. M. et al (editores). **Geologia Médica no Brasil: efeitos dos materiais e fatores geológicos na saúde humana e meio ambiente.** Workshop internacional de geologia Médica, Rio de Janeiro, Brasil. p.183 a 191. 2005.

FUNCEME. **Boletim Pluviométrico.** Disponível em: <http://www.funceme.br>. Acesso em: 17 de Janeiro de 2013. Fortaleza: FUNCEME, 2013.

GASPARY, J.; ANJOS, F. R. A; REBOUÇAS, A C.; MANUEL FILHO, J,; LEAL, O.; GARAU, J.P. ; GUILLOT, P. **Estudo geral das águas subterrâneas do Baixo Jaguaribe. In: Estudo Geral de Base do vale do Jaguaribe.** Hidrogeologia. SUDENE/ASMIC. Recife.1967. p170-202.

GEOMUNDO. Disponível em: <http://www.geomundo.com.br/meio-ambiente-40168.htm>. Acesso em: 13 de Novembro de 2012.

GOMES, D. F. **Caracterização limnológica de um ecossistema lacustre tropical - Lagoa do Uruaú - Planície costeira do município de Beberibe-Ceará.** Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Ceará – UFC. 1998.

GOMES, D. F. *et al.* **Relatório do projeto “caracterização geométrica e hidrogeológica do aluvião do rio Banabuiú – trecho Morada Nova”.** COGERH. 2009.

GOMES, D. F. **Estudo hidroquímico, isotópico e da dinâmica do nível estático das águas subterrâneas e superficiais da região de Limoeiro do Norte – Baixo Jaguaribe.** Tese de Doutorado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. Universidade Federal do Ceará – UFC. 2005.

HEALY, R. W.; COOK, P. G. **Using groundwater levels to estimate recharge.** Journal: Hydrogeology Journal - HYDROGEOL J , vol. 10, no. 1, pp. 91-109. 2002.

HIJO, C. A. G. **Quantificação do efeito do açude Castanhão sobre o fluxo fluvial de material particulado em suspensão e nutrientes para o estuário do rio Jaguaribe, Ceará – Brasil.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará. 2009.

HIRATA, R. **Vulnerabilidade e risco da contaminação dos recursos hídricos subterrâneos.** Revista Impactos Ambientais e Águas Subterrâneas no Brasil. Rio de Janeiro. 1997.

IAEA (International Atomic Energy Agency). **Stable isotope hydrology: Deuterium and oxygen-18 in the water cycle.** Vienna: IAEA. (Technical Reports Series, 210). 1981b.

IAEA (International Atomic Energy Agency). **Statistical treatment of environmental isotope data in precipitation.** Vienna: IAEA. 253p. (Technical Reports Series, 206). 1981.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Diagnóstico ambiental da Bacia do rio Jaguaribe: diretrizes gerais para a ordenação territorial.** Luiz Carlos Soares Gatto (Supervisor). Salvador: IBGE, Diretoria de Geociências e 1ª Divisão de Geociências do Nordeste - DIGEO 1/NE.1. 77p. 1999.

INPE. Disponível em: < <http://bancodedados.cptec.inpe.br/>> acesso em 14 de Janeiro de 2013.

IPECE. **Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará, 2010 e 2011. Anuário Estatístico.** Fortaleza. CE. 2010 e 2011.

IPLANCE. Fundação Instituto de Planejamento do Ceará. **Atlas do Ceara.** Fortaleza. 65p. 1997.

LENNTech. **Rimozione físico-química del ferro.** Disponível em: <<http://www.lenntech.com/italiano/rimozione-fisico-chimica-ferro.htm>> acesso em 04 de abril de 2008.

LIMA, E. A. *et al.* **Mapa de variação da qualidade das águas subterrâneas da região Nordeste do Brasil para uso na irrigação.** I Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo. 2009.

LOGAN, J. **Interpretação de análises químicas d'água.** Recife: US. Agency for International Development. 67p. 1965.

LOGAN, J. **Interpretação de análises químicas de água;** traduzido por Araknéa Martins de Lemos. Recife, s.c.p. 74p. 1967.

LONGHINI, M. D. e NARDI, R. **Como age a pressão atmosférica? algumas situações-problema tendo como base a história da ciência e pesquisas na área.** Caderno brasileiro de ensino de física. v. 26, n. 1: p. 7-23. 2009.

LOPES, M.F. DE O; VASCONCELOS, S.M.S.; GOMES, D.F. **Avaliação da qualidade das águas subterrâneas no município de Ocara – Ceará -** Revista de Geologia, Vol. 21, nº 1, 35-48. 2008.

MAIA, J.T.V. 2009. **Caracterização Hidrogeológica do Aluvião do rio Banabuiú –Ceará.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará. 2009.

MEIRELES, A.C.M. **Dinâmica qualitativa das águas superficiais da bacia do Acaraú e uma proposta de classificação para fins de irrigação.** Tese de Doutorado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Ceará – UFC. 2007.

MOBUS, G. 2003. **Qualigraf: software para interpretação de análises físico-químicas, versão Beta.** Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos – FUNCEME. Fortaleza. Disponível em: www.funceme.br. Acesso em: 05 de janeiro de 2013.

MOURA, I.B.M. **Aspectos hidrogeológicos do aluvião do rio banabuiú no trecho entre Morada Nova e Limoeiro do Norte – CE.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará. 2008.

NIENCHESKI, L.F. **Avaliação Ambiental de Estuários Brasileiros: Diretrizes Metodológicas.** Rio de Janeiro, Museu Nacional. p. 75 – 79. 2006.

NOGUEIRA, V. P. Q. **Qualidade da água em lagos e reservatórios.** In: PORTO, R.L.L. Hidrologia Ambiental. São Paulo: Editora do Estado de São Paulo. Cap.2, p.165-210. 1991.

POHLING, R. **Reações químicas na análise de água.** Arte Visual. Fortaleza. 2009.

PORTO, R. L. L. **Estabelecimento de Parâmetros de Controle da Poluição.** In: PORTO, R. L. L., BRANCO, S.M., CLEARY, R.W. *et al.*, Hidrologia Ambiental. São Paulo, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, ABRH. 1991.

PREFEITURA DE QUIXERAMOBIM. Disponível em: <<http://www.quixeramobim.ce.gov.br/index.php/conheca-quixeramobim/a-historia/>>. Acesso em: 02 de Janeiro de 2011.

REBOUÇAS, A. C. **Desenvolvimento e proteção das águas subterrâneas.** Revista Impactos Ambientais e Águas Subterrâneas no Brasil. Rio de Janeiro. 1997.

REDE DE TECNOLOGIA SOCIAL, 2008. Disponível em: <<http://www.rts.org.br/noticias/destaque-2/brasil-ultrapassa-meta-da-onu-para-a-agua>> Acesso em 25 de novembro de 2012.

RICHARDS, L. A. (ed). **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils.** Washington DC, US Department of Agriculture. 160 p. (USDA Agricultural Handbook, 60). 1954.

RICHTER, B. C.; KREITLER, C. W. **Geochemical techniques for identifying sources of ground-water salinization.** C. K. Smoley. USA. 258p. 1993.

RÖLLER, K., TREPMANN, C.A. **Stereo32 v. 1.0.3.** Ruhr-Universität Bochum, Instiut fur Geologie, Mineralogie & Geophysik, Bochum, Germany. 2008.

ROZANSKI, C.; ARÁGUAS-ARÁGUAS, L.; GONFIANTINI, R. **Isotopic patterns in modern global precipitation.** In: Continental Isotope Indicators of Climatic; American Geophysical Union Monograph. 1993.

RUSHTON, K.R. **Numerical and conceptual models for recharge estimation in arid and semi-arid zones.** In: I. Simmers, ed. *Estimation of natural groundwater recharge*. NATOASI Series C, Reidel Publishing Co. Vol 222, 223-238. 1987.

SALA DE FÍSICA. Disponível em: <http://www.geocities.ws/saladefisica5/leituras/evaporacao.html>. Acesso em: 14 de Outubro de 2012.

SALATI, E.; GUSMÃO, G. A ; MATSUI, E.; CERVELLINI, A. **Estudo preliminar das concentrações de ^{18}O e D em águas do Nordeste Brasileiro.** Boletim Científico – CENA – ESALQ –USP. 1971.

SANTIAGO, M. F.; SALATI, E.; MATSUI, E. **Fracionamento isotópico da água (^{18}O , D) do açude Santo Antonio de Russas durante a evaporação.** Revista Brasileira de Geociências, 05, p.106-112. 1975.

SANTIAGO, M. M. F. *et al.* **Isótopos ambientais na Bacia Sedimentar de Lavras da Mangabeira.** CPRM. 2007.

SANTIAGO, M. M. F. **Mecanismo de salinização em regiões semi-áridas. Estudo dos Açudes Pereira de Miranda e Caxitoré no Ceará.** Tese de Doutorado. IG-USP–São Paulo. 176 p. 1984.

SANTOS, A. C. **Noções de hidroquímica** in FEITOSA, F.A.C ; MANOEL FILHO, J. **Hidrogeologia. Conceitos e Aplicações.** 2ª edição, CPRM/REFO. LABHID-UFPE. 412p. 1997.

SHARPLEY, A.N. ; MENZEL, R.G. **The impact of soil and fertilizer phosphorus on the environment.** Adv.Agron. 1987.

SILVA, I. N. *et al.* **Qualidade de Água na Irrigação.** Revista Agropecuária Científica no Semiárido (ACSA), v.07. n 03. p. 01 – 15. 2011.

SIMMERS, I. **Estimation of natural groundwater recharge.** NATOASI Series C, Reidel Publishing Co. Vol 222, 223-238. 1987.

SNATURAL. **Uso de Bio-filtros na Criação de Peixe (Tilápia) em Tanques.** Disponível em: <http://www.snatural.com.br/Aquicultura-Producao-Intensiva.html>. Acesso em: 19 de Dezembro de 2012.

SRH, 2012. Disponível em: <http://atlas.srh.ce.gov.br/> Acesso em: 04 de Fevereiro de 2012.

THORNE. D.W., PETERSON H.B. in: **Metodi normalizzati di analisi del suolo.** Bolonha. 100p. 1985.

THORNTHWAITE, C. W. **An approach toward a rational classification of climate.** Geographical Review 38 (1): 55–94. 1948.

TUCCI, C.E.M. (1993) **Hidrologia – Ciência e Aplicação**. Porto Alegre. Ed. da Universidade, ABRH, EDUSP, 1993.

TUNDISI, J.G.; TUNDISI, T.M. **Limnologia**. Editora: Oficina de Textos. 1ª. Edição. 632p. 2008.

VANDER VELPEN, B. P. A. “**RESIST**” **Version 1.0**. M.Sc. Research Project. ITC: Netherlands, 1988.

VASCONCELOS, S.M.S. **Estimativa da recarga subterrânea a partir do balanço hídrico – Exemplo de Fortaleza, CE**. Revista de Geologia, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. P 27-34. 1996.

VASCONCELOS, S.M.S. **Recarga do aquífero dunas/paleodunas, Fortaleza-CE**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de São Paulo. São Paulo. 100p. 1999.

VIEIRA, G. H. S. **Salinização de solos em áreas com irrigação por superfície**. Disponível em: <<http://www.angelfire.com/nb/irrigation/textos/saliniza.htm>>. Acesso em: 20 de Novembro de 2012.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: Mc Graw Hill. 245 p. 1975.

VON SPERLING, M. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas residuárias**. 3 ed. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental/UFMG, Belo Horizonte, MG, 2005.

ZOHDY, A.A.R.; BISDORF, R.J. **Programs for the automatic processing and interpretation of Schlumberger sounding curves in QuickBasic 4.0**. USGS, Open-File Report, A&B, 89-137. 1989.

ZOHDY, A.A.R. **A new method for the automatic interpretation of Schlumberger and Wenner sounding curves**. Geophysics 54: 245- 253. 1989.

ANEXOS

ANEXO A – Curvas de Campo e SEVs interpretadas pelos softwares Ato e Resist.

