



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CAMPUS CRATEÚS  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

**MARCELA VERÍCIMO DO NASCIMENTO**

**PROCESSOS DOMINANTES QUANTO À SALINIZAÇÃO DE RESERVATÓRIOS  
EM PERÍODO DE ESTIAGEM PROLONGADA: O CASO DO BANABUIÚ**

**CRATEÚS**

**2019**

MARCELA VERÍCIMO DO NASCIMENTO

**PROCESSOS DOMINANTES QUANTO À SALINIZAÇÃO DE RESERVATÓRIOS  
EM PERÍODO DE ESTIAGEM PROLONGADA: O CASO DO BANABUIÚ**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Ceará, *Campus* Crateús, como requisito parcial para obtenção do título do grau de bacharel de Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Alan Michell Barros Alexandre

CRATEÚS

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- N196p Nascimento, Marcela Verícimo do.  
Processos dominantes quanto à salinização de reservatórios em período de estiagem prolongada : o caso do Banabuiú / Marcela Verícimo do Nascimento. – 2019.  
59 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Curso de Engenharia Ambiental, Crateús, 2019.  
Orientação: Prof. Dr. Alan Michell Barros Alexandre.
1. Qualidade da água. 2. Semiárido. 3. Salinização de reservatórios. I. Título.

CDD 628

---

MARCELA VERÍCIMO DO NASCIMENTO

**PROCESSOS DOMINANTES QUANTO À SALINIZAÇÃO DE RESERVATÓRIOS  
EM PERÍODO DE ESTIAGEM PROLONGADA: O CASO DO BANABUIÚ**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Ceará, *Campus* Crateús, como requisito parcial para obtenção do título do grau de bacharel de Engenharia Ambiental.

Aprovada em: \_\_/\_\_/\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Alan Michell Barros Alexandre (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Fernando José Araújo da Silva (Examinador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)  
Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA)

---

Profa. Me. Janine Brandão de Farias Mesquita (Examinadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC) – Campus Crateús

---

Profa. Me. Larissa Granjeiro Lucena (Examinadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC) – Campus Crateús

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por sentir a presença dele em cada etapa deste trabalho e por ter colocado cada pessoa citada nesta página em meu caminho.

Agradeço ao meu pai José Barroso que apesar de não está mais na Terra, me ensinou valores que seguem comigo.

Agradeço a minha mãe Bernardete Cadordoço pelo apoio incondicional durante esse período e ao meu padrasto Valquemar Oliveira por cuidar dela.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Alan Michell, por toda credibilidade depositada em mim e disponibilidade ao longo do desenvolvimento deste estudo.

Agradeço ao Prof. Dr. Fernando José por compartilhar parte do conhecimento construído em todos seus anos de carreira acadêmica.

Agradeço aos meus amigos que compreenderam minha ausência, Mizelle Macêdo, em especial ao meu namorado Antônio Kevin.

Agradeço aos meus colegas de faculdade Monalisa Elias por toda ajuda, ao Francisco Alisson por todo apoio e todos aqueles que torceram por mim mesmo em silêncio.

Agradeço ao Wesley Araújo por cuidar da documentação do estágio e passar seus conhecimentos para mim.

Agradeço a Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará (COGERH) por ceder os dados que tornaram esse estudo possível.

*Tudo tem o seu tempo determinado, e há tempo  
para todo o propósito debaixo do céu.  
(Eclesiastes 3:1)*

## RESUMO

As condições climatológicas e litológicas do semiárido são responsáveis pela intermitência dos corpos hídricos superficiais e para garantir o abastecimento de água é necessário armazenar águas. Neste contexto, a salinização causa a deterioração da qualidade da água nos reservatórios e prejudica diversos usos, dentre eles destaca-se a agricultura. A dinâmica dos sais é influenciada por diversos fatores, para analisá-los buscou-se associar as ferramentas da hidroquímica e os índices de qualidade da agricultura para designar os processos responsáveis pelas alterações. Este estudo objetivou determinar os processos dominantes na salinização do reservatório de grande porte Banabuiú e os efeitos na qualidade da água para agricultura durante a estiagem prolongada ao avaliar o período de 2005 a 2018. Para tanto, utilizou correlações lineares, dados de precipitação, dados do reservatório, Razões Iônicas, Índices Cloro-alcalinos, Diagrama de Gibbs, Índice de saturação Langelier, Carbonato de Sódio Residual, Razão de Adsorção de Sódio, Diagrama USSL e Diagrama de Piper. Durante a estiagem prolongada houve o predomínio das hierarquias catiônicas e aniônicas,  $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$  e  $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{CO}_3^{2-} > \text{NO}_3^-$ . Constatou-se a acumulação do cálcio, potássio e magnésio. O mecanismo de salinização dominante identificado foi o intemperismo com o efeito concentrador dos fatores climáticos. Outros processos secundários atuantes foram constatados: trocas iônicas reversas, influência de terrenos dolomíticos, dentre outros. As águas do reservatório não possuem risco de sodificação, apresentaram de forma predominante médio risco de salinização e atingiu um alto risco de salinização. Esses resultados indicam a origem dos íons e a influência da estiagem na composição iônica do reservatório Banabuiú.

**Palavras-chave:** Qualidade de água. Semiárido. Salinização de reservatórios.

## ABSTRACT

The climatic and lithological conditions of the semi-arid northeast of Brazil are responsible for the intermittence of the surface water bodies and to guarantee the water supply it is necessary to store water. In this context, salinization causes deterioration of the water quality in the reservoirs and harms several uses, mainly in the agriculture. The dynamics of salts is influenced by several factors. In order to analyze them, the aim was to associate the tools of hydrochemistry and the quality indexes of agriculture to designate the processes responsible for the changes. This study aimed to determine the dominant processes in the salinization of the large reservoir Banabuiú and the effects on water quality for agriculture during prolonged drought when evaluating the period from 2005 to 2018. For this, it used linear correlations, precipitation data, Ionic Ratios, Chloro-alkaline Indices, Gibbs Diagram, Langelier Saturation Index, Residual Sodium Carbonate, Sodium Adsorption Ratio, USSS Diagram, and Piper Diagram. During prolonged drought, the predominance of the cationic and anionic hierarchies,  $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$  and  $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{CO}_3^{2-} > \text{NO}_3^-$  was observed. Accumulation of calcium, potassium and magnesium was observed. The dominant salinization mechanism identified was weathering with the concentrating effect of climatic factors. Other active secondary processes were verified: reverse ionic exchanges, influence of dolomitic terrains, among others. The waters of the reservoir do not present a risk of sodification, they presented predominantly average risk of salinization and reached a high risk of salinization. These results indicate the origin of the ions and the influence of the drought in the ionic composition of the Banabuiú reservoir.

**Keywords:** Water quality. Semiarid. Salinization in reservoirs.



## LISTA DE ILUSTRAÇÃO

Figura 1	–	Diagrama de Gibbs para cátions e ânions .....	24
Figura 2	–	Resultado do diagrama de Gibbs para cátions.....	46
Figura 3	–	Resultado do diagrama de Gibbs para ânions.....	46
Figura 4	–	Classificação do diagrama USSL para as águas do Banabuiú.....	49
Figura 5	–	Resultado do diagrama de Piper para as águas do Banabuiú.....	51

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Informações gerais sobre o reservatório Banabuiú.....	22
Tabela 2	–	Equações e interpretação para Razões Iônicas.....	25
Tabela 3	–	Equações e interpretação dos Índices Cloro-alcalinos.....	25
Tabela 4	–	Interpretação do Índice de Saturação de Langelier.....	27
Tabela 5	–	Classificação do Carbonato de Sódio Residual.....	27
Tabela 6	–	Classificação das águas segundo USSL.....	28
Tabela 7	–	Estatística descritiva dos parâmetros de qualidade.....	30
Tabela 8	–	Hierarquia da dominância de cátions e ânions.....	34
Tabela 9	–	Interpretação dos resultados da razão iônica $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$ .....	42
Tabela 10	–	Interpretação dos resultados da razão iônica $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ .....	43
Tabela 11	–	Resultados dos Índices Cloro-alcalinos.....	44
Tabela 12	–	Resultados e classificação do Índice de Langelier.....	47
Tabela 13	–	Resultados e classificação do Carbonato de Sódio Residual.....	48
Tabela 14	–	Resultados e classificação da Razão de Adsorção de Sódio e condutividade elétrica.....	50
Tabela 15	–	Classificação das águas segundo diagrama de Piper.....	52

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	–	Variação de volume e precipitação no reservatório Banabuiú.....	29
Gráfico 2	–	Correlação com CE e profundidade.....	31
Gráfico 3	–	Correlação com sólidos totais dissolvidos e CE.....	32
Gráfico 4	–	Correlação com sólidos totais dissolvidos e profundidade.....	32
Gráfico 5	–	Correlação com magnésio e CE.....	32
Gráfico 6	–	Correlação com magnésio e profundidade.....	32
Gráfico 7	–	Correlação com cálcio e profundidade.....	33
Gráfico 8	–	Correlação com cálcio e magnésio.....	33
Gráfico 9	–	Correlação com cálcio e cloreto.....	33
Gráfico 10	–	Correlação com magnésio e cloreto.....	33
Gráfico 11	–	Variação anual das razões em relação ao volume disponível.....	36
Gráfico 12	–	Variação anual da concentração de bicarbonato e cloreto.....	37
Gráfico 13	–	Correlação com cloreto e CE.....	37
Gráfico 14	–	Correlação com razão $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$ e profundidade.....	38
Gráfico 15	–	Variação anual da concentração de cálcio e magnésio.....	39
Gráfico 16	–	Variação semestral das razões iônicas em relação ao volume.....	40
Gráfico 17	–	Variação semestral da concentração de bicarbonato e cloreto.....	40

Gráfico 18	–	Correlação com razão iônica $Cl^-/\sum \text{ânions}$ e profundidade.....	41
Gráfico 19	–	Correlação com razão iônica $Cl^-/HCO_3$ e profundidade.....	41
Gráfico 20	–	Variação semestral do cloreto e sódio.....	42
Gráfico 21	–	Variação semestral dos Índices Cloro-alcalinos.....	45

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CE	Condutividade Elétrica
COGERH	Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra as Secas
RMQA	Rede de Monitoramento da Qualidade da Água
pH	Potencial Hidrogeniônico
pHs	Potencial de Saturação do Carbonato
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
ANA	Agência Nacional de Águas
LSI	Índice de Saturação de Langelier
STD	Sólidos totais dissolvidos
Alc	Alcalinidade
CAI	Índice Cloro-alcálico
RAS	Razão de Adsorção de Sódio
USSL	Laboratório de Salinidade dos Estados Unidos
ILS	Índice de Saturação de Langelier
CSR	Carbonato de Sódio Residual
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	15
<b>1.1</b>	<b>Considerações iniciais</b> .....	15
<b>1.2</b>	<b>Motivação do estudo</b> .....	15
<b>1.3</b>	<b>Objetivos</b> .....	16
<b>1.3.1</b>	<b>Objetivo geral</b> .....	16
<b>1.3.2</b>	<b>Objetivos específicos</b> .....	16
<b>1.4</b>	<b>Estrutura do trabalho</b> .....	16
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	17
<b>2.1</b>	<b>Processo de salinização de corpos superficiais</b> .....	18
<b>2.2</b>	<b>Conteúdo iônico de águas no semiárido brasileiro</b> .....	18
<b>2.2.1</b>	<b>Hidroquímica</b> .....	19
<b>2.2.1.1</b>	<i>Razões Iônicas</i> .....	19
<b>2.2.1.2</b>	<i>Índices Cloro-alcalinos</i> .....	19
<b>2.2.1.3</b>	<i>Diagrama de Gibbs</i> .....	19
<b>2.2.1.4</b>	<i>Índice de Saturação de Langelier</i> .....	20
<b>2.2.1.5</b>	<i>Carbonato de Sódio Residual</i> .....	21
<b>2.2.1.6</b>	<i>Razão de Adsorção do Sódio</i> .....	21
<b>2.2.1.7</b>	<i>Classificação das águas do reservatório</i> .....	21
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	22
<b>3.1</b>	<b>Caracterização do estudo</b> .....	22
<b>3.2</b>	<b>Reservatórios do estudo</b> .....	22
<b>3.3</b>	<b>Dados do estudo</b> .....	23
<b>3.4</b>	<b>Abordagem estatística</b> .....	24
<b>3.4.1</b>	<b>Hidroquímica</b> .....	24
<b>3.4.1.1</b>	<i>Razões iônicas</i> .....	24
<b>3.4.1.2</b>	<i>Índices Cloro-alcalinos</i> .....	25
<b>3.4.1.3</b>	<i>Diagrama de Gibbs</i> .....	26
<b>3.4.1.4</b>	<i>Índice de Saturação de Langelier</i> .....	26
<b>3.4.1.5</b>	<i>Carbonato de Sódio Residual</i> .....	27
<b>3.4.1.6</b>	<i>Razão de Adsorção de Sódio</i> .....	27
<b>3.4.1.7</b>	<i>Classificação das águas do reservatório</i> .....	28
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	29
<b>4.1</b>	<b>Caracterização do período de estiagem</b> .....	29
<b>4.2</b>	<b>Hidroquímica</b> .....	30
<b>4.2.1</b>	<b><i>Varição do volume hídrico disponível nos açudes do estudo</i></b> .....	31
<b>4.2.2</b>	<b><i>Variações do caráter hidroquímico das águas dos açudes</i></b> .....	34
<b>4.2.3</b>	<b><i>Variações das Razões Iônicas</i></b> .....	36
<b>4.2.3.1</b>	<i>Varição interanual</i> .....	36
<b>4.2.3.2</b>	<i>Varição semestral e interpretação das Razões Iônicas</i> .....	39
<b>4.2.4</b>	<b><i>Índices Cloro-alcalinos</i></b> .....	44
<b>4.2.5</b>	<b><i>Diagrama de Gibbs</i></b> .....	45
<b>4.2.6</b>	<b><i>Índice de Saturação de Langelier</i></b> .....	47
<b>4.2.7</b>	<b><i>Carbonato de Sódio Residual</i></b> .....	48
<b>4.2.8</b>	<b><i>Razão de Adsorção do Sódio</i></b> .....	49
<b>4.2.9</b>	<b><i>Classificação das águas do reservatório</i></b> .....	51

<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>53</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>54</b>

## **1 INTRODUÇÃO**

### **1.1 Considerações iniciais**

O clima semiárido é caracterizado por longos períodos secos, alternados por estações chuvosas de curta duração, com alta variabilidade espacial e temporal (ARRAES, 2007). A região apresenta a predominância de solos rasos sobre substratos rochosos cristalinos pré-cambrianos (COSTA; MELO; SILVA, 2006). Dessa forma, os atributos climáticos associados à litologia determinam a intermitência da rede hidrográfica e causam situações frequentes de escassez de água.

O estado do Ceará possui a maior parte do território inserido na região semiárida e se destacou pelo pioneirismo na instalação da política de açudagem em busca de amenizar a falta de água, principalmente durante os períodos de secas (ANDRADE; MEIRELES; PALÁCIO, 2010). A construção dos açudes ao regularizar as vazões, permite os usos múltiplos da água para abastecimento humano e animal considerados prioritários, bem como irrigação, abastecimento industrial, entre outros usos (VIEIRA, 2003).

As águas armazenadas nos reservatórios estão sujeitas ao processo de salinização devido às altas taxa de evaporação, que são capazes de concentrar os sais ao ponto de impedir o uso para consumo humano e na agricultura (PEREIRA *et al.*, 2006). Além disso, a composição dos íons na água é influenciada pelos solos da bacia hidrográfica, fatores climatológicos, intercâmbio água-sedimento e pelas atividades humanas (PAYNE, 1986).

### **1.2 Motivação do estudo**

A salinização é um processo que afeta a qualidade da água para diversos usos, na agricultura torna-se um fator limitante para algumas culturas. Assim, é relevante para essa atividade conhecer o teor total de sais solúveis presentes na água e o comportamento de seus íons dominantes (AYERS & WESCOST, 1999). Diversos trabalhos desenvolvidos nesta área buscam classificar as águas superficiais do semiárido em faixas de acordo com o conteúdo iônico para adaptar a escolha de culturas e o manejo adequado do solo, como os realizados por Vasconcelos *et al.* (2009) e Moreira, *et al.* (2016). Neste contexto, o presente estudo visa contribuir para o conhecimento dos processos dominantes nos reservatórios do semiárido que influenciam a dinâmica dos sais no reservatório Banabuiú no período de 2005 a 2018.



### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo geral**

Determinar, através de razões iônicas, os processos dominantes de interação hidroquímica em águas de um reservatório de grande porte do semiárido brasileiro sob condição de estiagem prolongada.

#### **1.3.2 Objetivos específicos**

Este trabalho visa atender os seguintes objetivos específicos:

- a) Analisar a evolução das concentrações de íons maiores em um reservatório de grande porte do semiárido brasileiro;
- b) Determinar os íons com tendência de acumulação mais acentuada;
- c) Determinar índices iônicos quanto ao seu uso na irrigação;
- d) Determinar a dominância catiônica e aniônica;
- e) Determinar os processos dominantes na salinização.

### **1.4 Estrutura do trabalho**

Este Trabalho de Conclusão de Curso está dividido em 5 seções. A Seção 1, que é esta, introduz o tema, apresenta a motivação do estudo, os objetivos e a organização do trabalho. A Seção 2 traz o referencial teórico, aborda o contexto da escassez de água na região Nordeste, o processo de salinização e as relações pertinentes ao estudo da composição iônica. A Seção 3 apresenta o reservatório sob estudo, contém as equações que possibilitam o estudo hidroquímico, a abordagem estatística e os recursos computacionais empregados. A Seção 4 é constituída por resultados das relações hidroquímicas com a variação de volume do reservatório Banabuiú, discussões sobre a evolução química e processos predominantes durante o período de estiagem prolongada. Por fim, a Seção 5 descreve as conclusões acerca do processo observado.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

O estado do Ceará possui 76,16% do território inserido na região semiárida (CAITANO; LOPES; TEIXEIRA, 2001). A escassez de água é recorrente na região devido às características climáticas, como as precipitações anuais distribuídas irregularmente no espaço e tempo associados às altas taxas de evaporação são responsáveis pela intermitência da maior parte dos recursos hídricos (FROTA JÚNIOR *et al.*, 2007; ARAÚJO NETO *et al.*, 2015). O regime de precipitação exibe uma variabilidade interanual e intranual, no qual a precipitação concentra-se entre os meses de fevereiro a maio (quadra chuvosa) e atinge cerca 70% da precipitação anual (CORTEZ; LIMA; SAKAMOTO, 2017).

Além dos fatores climáticos, os atributos geológicos influenciam na temporalidade da hidrografia. O estado do Ceará abrange a litologia cristalina e sedimentar, no entanto cerca de 70% do território é formado pelo embasamento cristalino (SILVA; ARAÚJO; SOUZA, 2007). O embasamento cristalino é composto por rochas ígneas e metamórficas pré-cambrianas impermeáveis e apresenta solos rasos, que resultam em condições de baixa capacidade de armazenamento e aumento da contribuição do escoamento (AUDRY; SUASSUNA, 1995).

Os reservatórios tornam possível a regularização do acesso à água ao longo do ano, permitindo que a população nordestina sobreviva num ambiente de características físicas e climáticas desfavoráveis. Devido à inexistência de rios permanentes e às poucas reservas subterrâneas, a oferta de água confiável para usos como irrigação está condicionada à existência de reservatórios superficiais (CAMPOS, 1995). Dessa forma, a implantação de reservatórios torna-se mais essencial, principalmente na segunda metade do ano, época na qual a agricultura necessita da irrigação em razão do déficit hídrico para as culturas na época seca (GHEYI; LACERDA; GOMES FILHO, 2016).

A seca hidrológica está relacionada com a quantidade insuficiente de água para atender às demandas estabelecidas de determinada região, possui como possíveis causas a deficiência do escoamento superficial e/ou mal gerenciamento dos recursos hídricos (CAMPOS, 1995; CAMPOS; STUDART, 2001). As secas são frequentes na região semiárida, no entanto a seca de 2012 a 2015 é considerada a pior nas últimas décadas e causou efeitos devastadores nos setores agrícola, pecuário e industrial (MARENGO; CUNHA; ALVES, 2016).

## 2.1 Processo de salinização de corpos superficiais

A incidência da precipitação na bacia hidrográfica gera escoamentos superficiais e subsuperficiais carreando nutrientes e minerais para o corpo hídrico, o que resulta no aumento da quantidade de sais nos reservatórios à jusante (SILVA JÚNIOR *et al.*, 2000). Como a água é um solvente quimicamente ativo, as interações com as mais diversas superfícies em contato determinam sua constituição química (SANTOS *et al.*, 2017). As principais diferenças na qualidade da água estão associadas ao tempo de retenção do reservatório (TUNDISI; TUNDISI, 2008). A renovação da água sofre influência da geometria, profundidade, área inundada e da composição da água armazenada nos reservatórios (JÚNIOR; COLLISCHONN; NES, 2010).

No semiárido a alternância entre estações chuvosas e secas, causa uma série de fenômenos de diluição e concentração de sais nas águas dos açudes (LARAQUE, 1991). Este processo torna a composição iônica mais concentrada e favorece o avanço do processo de salinização, sobretudo devido aos valores para evaporação da ordem de 2 metros de água por ano (AUDRY; SUASSUNA, 1995). A redução do volume do reservatório altera as concentrações dos íons e a precipitação química atua devido ao alcance da solubilidade máxima numa sequência preferencial de carbonatos, sulfatos e cloretos que depende da proporção dos íons (AUDRY; SUASSUNA, 1995; TUNDISI; TUNDISI, 2008).

## 2.2 Conteúdo iônico de águas no semiárido brasileiro

Nas águas superficiais geralmente são encontrados íons como cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), potássio ( $\text{K}^+$ ), bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ), cloretos ( $\text{Cl}^-$ ), sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) e nitratos ( $\text{NO}_3^{2-}$ ) (PORTO *et al.*, 1991). No entanto, as composições dos sais dissolvidos variam de acordo com as diferenças climatológicas e litológicas das regiões (TUNDISI; TUNDISI, 2008). Numa análise de 504 amostras de águas localizadas no Nordeste brasileiro oriundas de poços, cacimbões, rios, riachos e em sua maioria de açudes, foi constatada a predominância de sódio, bicarbonato e cloreto, bem como encontraram para cátions a hierarquia  $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$  e para ânions  $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^-$  (LEPRUN, 1988). Outro estudo das águas superficiais do semiárido também verificou maiores concentrações de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$  e  $\text{HCO}_3^-$  (LARAQUE, 1991).

## 2.2.1 Hidroquímica

### 2.2.1.1 Razões Iônicas

As razões iônicas são as relações entre os íons dissolvidos em água e são empregadas na hidroquímica para compreender os processos que controlam as mudanças na qualidade da água (SAMI, 1992; MERCHÁN *et al.*, 2015). Diante disso, podem ser estabelecidas de acordo com o problema a ser estudado (SANTOS, 2000). As razões mais frequentes em estudos hidrogeoquímicos são  $Mg^{2+}/Ca^{2+}$  e  $K^+/Na^+$  (CUSTÓDIO; LLAMAS, 1983).

Devido ao bicarbonato ( $HCO_3^-$ ) ser relativamente comum em águas subterrâneas, utiliza-se para entender o processo de concentração de sais no sentido do fluxo subterrâneo. Um ligeiro aumento na razão  $Cl^-/HCO_3^-$  indica um avanço no processo de concentração de sais (GETA; INGLÉS, 1988). A razão  $Na^+/Cl^-$  é para verificar a existência de intrusão salina, quando a água salina desloca a água subterrânea, a relação alcalinos/cloreto diminui com relação aos valores da água doce e, frequentemente, alcançam valores mais baixos que águas marinhas (FEITOSA, 2008). Nas águas continentais, a razão  $Mg^{2+}/Ca^{2+}$  varia comumente entre 0,3 e 1,5, já a água do mar tem razão  $Mg^{2+}/Ca^{2+}$  em torno de 5. Esta razão pode se tornar elevada devido à circulação das águas em litologias de origem marinha ou que tenham sofrido mistura com a água do mar (GETA; INGLÉS, 1988).

### 2.2.1.2 Índices Cloro-alcalinos

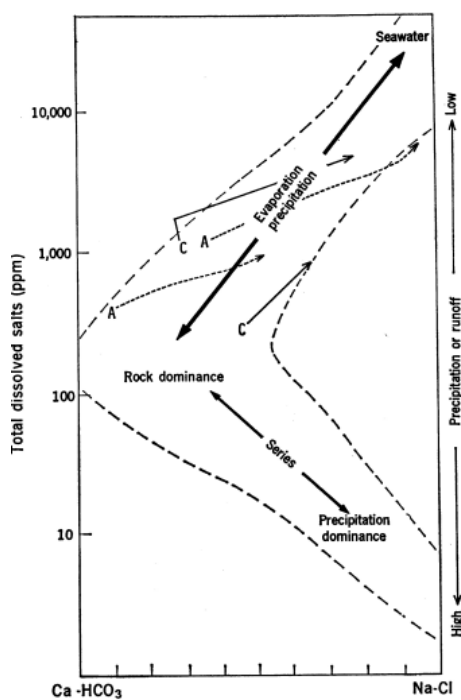
Os Índices Cloro-alcalinos (CAI) possibilitam a compreensão da troca iônica entre a água subterrânea e o meio de contato durante a residência ou transporte, por meio das relações propostas por Schoeller (1977). A interpretação do processo deve ser baseada nos sinais dos índices, assim um valor positivo indica a troca iônica reversa do  $Na^+$  e  $K^+$  presentes na água por  $Mg^{2+}$  e  $Ca^{2+}$  na rocha. Um valor negativo significa que a reação é de troca iônica, na qual  $Mg^{2+}$  e  $Ca^{2+}$  na água são trocados por  $Na^+$  e  $K^+$  da rocha (RAJU; SHUKLA; RAM, 2011; KAWO; KARUPPANNAN, 2018).

### 2.2.1.3 Diagrama de Gibbs

O diagrama de Gibbs, conforme Figura 1, estuda a salinidade de águas superficiais por três mecanismos que controlam a química destas águas: precipitação atmosférica, domínio de rochas (intemperismo) e evaporação-cristalização (GIBBS, 1970).

Gibbs (1970) identificou os principais cátions que caracterizam as águas superficiais do mundo são  $\text{Ca}^{2+}$ , para água doce, e  $\text{Na}^+$  para águas salinas e criou um diagrama com um *boomerang* obtido pela plotagem das razões  $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ , no eixo horizontal, *versus* Sólidos Totais Dissolvidos (STD), no eixo vertical, para identificar os mecanismos predominantes nos tipos de águas estudadas para os cátions. Já para os ânions foi utilizada a razão  $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ , no eixo horizontal, *versus* STD, no eixo vertical, nas águas superficiais naturais e do mar de locais ao redor do mundo (PEREIRA *et al.*, 2004). Outros fatores secundários, como vegetação e composição do material da bacia são responsáveis por pequenos desvios dentro das três zonas maiores regidas pelos mecanismos de controle (GIBBS, 1970).

Figura 1 – Diagrama de Gibbs.



Fonte: Gibbs (1970).

#### 2.2.1.4 Índice de Saturação de Langelier

O Índice de Saturação de Langelier (ISL) foi proposto por Langelier (1936) para indicar a tendência do carbonato de cálcio de precipitar, ou não, em águas de pH entre 6,5 e 9,5. Esse índice compara o pH da amostra de água com o pH da água de saturação (pHs) para verificar se ocorre a precipitação de carbonato de cálcio. Na agricultura, a precipitação de carbonatos de cálcio causa principalmente o entupimento de sistemas de irrigação do tipo gotejadores (MELO; COELHO; TEIXEIRA, 2008).

#### 2.2.1.5 Carbonato de Sódio Residual

O cálculo da Razão de Adsorção do Sódio (RAS) considera apenas os cátions para analisar o comportamento do conteúdo iônico, para uma análise mais abrangente é necessário incluir o Carbonato de Sódio Residual (CSR) proposto por Eaton (1950). Águas com altas concentrações desses íons tendem a precipitar íons de cálcio e magnésio como carbonatos. O aumento da proporção relativa de sódio na forma de bicarbonato de sódio na água, causa problemas de infiltração nos solos, já o de magnésio, formação de sais (NISHANTHINY *et al.*, 2010).

#### 2.3.1.6 Razão de Adsorção do Sódio

O íon sódio ao predominar induz a troca dos íons de cálcio e magnésio por ele no complexo de adsorção do solo, processo chamado de sodificação, que possui a capacidade de causar redução na permeabilidade e danos na estrutura (AUDRY; SUASSUNA, 1992; ARAÚJO NETO *et al.*, 2015). Diante desse processo, a Razão de Adsorção de Sódio (RAS) exprime a proporção relativa do sódio em relação a soma do cálcio e magnésio para determinar o risco de sodificação.

#### 2.2.1.7 Classificação das águas do reservatório

O diagrama de Piper fornece uma visão sintetizada da composição catiônica e aniônica da água por intermédio das proporções relativas em miliequivalentes por litro (meq/L). Formado por dois diagramas triangulares inferiores à esquerda e à direita, os quais representam respectivamente a composição relativa catiônica e aniônica, bem como um diagrama intermediário no formato de losango que une a composição de cátions e ânions (SINGH *et al.*, 2005).

### 3 METODOLOGIA DE PESQUISA

#### 3.1 Reservatório do estudo

O estudo utilizou os dados do reservatório Banabuiú (ou Arrojado Lisboa) durante o período de 2005 a 2018. O açude está localizado no município de Banabuiú, estado do Ceará, a cerca de 230 km de Fortaleza. Foi construído pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS) entre os anos de 1952 e 1966 (DNOCS, 2017). Este açude pertence a sub-bacia do Banabuiú, a qual compõe, junto com outras quatro, a bacia do Jaguaribe (CEARÁ, 2009). Outras características do reservatório estão dispostas na Tabela 1.

Tabela 1 – Informações gerais sobre o reservatório Banabuiú.

<b>Características</b>	<b>Reservatório Banabuiú</b>
Bacia	Jaguaribe
Rio barrado	Banabuiú
Tributários	Rio Patú, rio Quixeramobim, rio Sitiá e riacho Livramento
Latitude	05° 19' 41,16" S
Longitude	38° 55' 21,82" W
Área da bacia hidrográfica (km <sup>2</sup> )	13.500
Área da bacia hidráulica (ha)	10.200
Capacidade (m <sup>3</sup> )	1.601.000.000
Profundidade (m)	142,50

Fonte: ANA (2017) e DNOCS (2019).

O rio Banabuiú nasce na Serra das Guaribas, município de Pedra Branca e percorre um total de 314 km até desembocar no rio Jaguaribe nas proximidades da cidade de Limoeiro do Norte (CEARÁ, 2009). Na sub-bacia hidrográfica do Banabuiú predominam os solos argissolos, luvisolos, neossolos, chernossolos, vertissolos e planossolos sobre os quais se desenvolve a vegetação de caatinga arbustiva, em manchas mais ou menos densas (COGERH, 2011).

A Sub-bacia do Banabuiú apresenta um padrão geológico simples com predomínio de rochas do embasamento cristalino (96,53%), representadas por gnaisses e migmatitos diversos, associados a rochas plutônicas e metaplutônicas de composição predominantemente granítica, Pré-Cambriano (CEARÁ, 2009). Está inserida na região climática do tipo BShw, classificação climática de Köppen, que pode ser definida Tropical Quente Semiárido

apresentando regime de chuva irregular e deficiência hídrica de baixa (COGERH, 2011).

Os reservatórios Banabuiú e Pedras Brancas perenizam os respectivos trechos de jusante e compartilham as demandas existentes ao longo de parte do rio Banabuiú, bem como contribuem junto ao reservatório Castanhão no abastecimento das demandas existentes no trecho final do rio Jaguaribe (ANA, 2017). O açude Banabuiú abastece as sedes municipais de Aracati, Banabuiú, Fortim, Jaguaruana, Limoeiro do Norte, Morada Nova, Quixeré e Russas (ANA, 2017). Além disso, possui as seguintes finalidades: a irrigação das terras do Baixo Jaguaribe, onde se destaca o Projeto de Irrigação Morada Nova; controle das cheias do rio Banabuiú; piscicultura e aproveitamento das áreas de montante (DNOCS, 2019).

### 3.3 Dados do estudo

O estudo utilizou os dados dos parâmetros de qualidade da água do reservatório Banabuiú provenientes do banco de dados da Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará (COGERH) durante período de 2005 a 2018. As coletas de amostras foram realizadas de acordo com o protocolo da Rede de Monitoramento da Qualidade da Água (RMQA) da COGERH com frequência trimestral. Neste estudo, para avaliação hidrológica considerou-se o período anual e para os processos hidroquímicos considerou-se dois períodos do ano para avaliação (1º e 2º semestres).

O reservatório do estudo possui pontos (ou estações) de monitoramento da qualidade da água, no qual foram efetuadas coletas de amostras a 0,3 m abaixo da superfície líquida. Para o enfoque aqui considerado, cada reservatório foi admitido com dispersão infinita (*i.e.*, mistura completa), dessa maneira todos os pontos do corpo superficial apresentam o mesmo estado. Diante dessa consideração, os parâmetros empregados no estudo foram: cálcio ( $\text{Ca}^+$ ), magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), potássio ( $\text{K}^+$ ), sódio ( $\text{Na}^+$ ), bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ), carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), cloreto ( $\text{Cl}^-$ ), nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) e sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). Além desses, os dados relacionados ao potencial hidrogeniônico (pH), condutividade elétrica (CE) e sólidos totais dissolvidos (STD) fornecem subsídios para a análise.

Os dados oriundos do reservatório, como profundidade e fração do volume disponível (VD) foram extraídos do Portal Hidrológico do Ceará. Por outro lado, os dados de precipitação anual sobre a bacia hidráulica do Banabuiú foram determinados com a utilização da base de dados da estação Banabuiú (Código ANA 538025) proveniente do Portal *HidroWeb*, e a normal climatológica foi retirada dos dados da Fundação Cearense de Meteorologia e



Recursos Hídricos (FUNCEME). A normal climatológica considera as precipitações médias anuais no período de 1981 a 2010, que resultou no valor de 734,9 mm para o município de Banabuiú-CE (FUNCEME, 2019).

### 3.4 Abordagem estatística

A estatística descritiva dos dados é utilizada para organizar, resumir e descrever os aspectos importantes de um conjunto de características observadas ou comparar tais características entre dois ou mais conjuntos (REIS; REIS, 2002). Neste caso, embasou a compreensão das variações dos parâmetros utilizados durante o período de estudo. Os parâmetros utilizados foram: média, mínimo, máximo, desvio-padrão (s), 1º quartil e 3º quartil.

O coeficiente de correlação de Pearson (r) mede o grau da correlação linear entre duas variáveis quantitativas que reflete a intensidade de uma relação linear entre dois conjuntos de dado com valores situados ente -1,0 e 1,0 (BERMUDEZ-EDO; BARNAGHI; MOESSNER, 2018). De forma qualitativa, pode ser avaliado como: 0,00 a 0,30 indica fraca correlação; 0,30 a 0,60 indica média correlação; 0,60 a 0,90 indica forte correlação e 0,90 a 1,00 indica correlação muito forte (CALLEGARI-JACQUES, 2003). Esta ferramenta foi empregada para avaliar os dados relevantes para a compreensão do processo de salinização.

#### 3.4.1 Hidroquímica

As características dos parâmetros empregados no estudo foram analisadas através da estatística descritiva básica. Para determinar os processos determinantes na salinização foram computadas as Razões Iônicas, Índices Cloro-alcálinos, relações para construir o diagrama de Gibbs, Índice de Saturação de Langelier, Carbonato de Sódio Residual, Razão de Adsorção do Sódio, diagrama do Laboratório de Salinidade dos Estados Unidos (USSL) e diagrama de Piper. Após o cômputo, mediante a interpretação do significado de cada elemento calculado foram determinados os processos que influenciam a dinâmica dos sais.

##### 3.4.1.1 Razões iônicas

As Razões Iônicas foram calculadas utilizando os seguintes parâmetros de qualidade: Cl<sup>-</sup> (cloreto), HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (bicarbonato),  $\Sigma$ ânions (somatório dos ânions), Na<sup>+</sup>(sódio), Mg<sup>2+</sup> (magnésio) e Ca<sup>2+</sup> (cálcio), em meq/L. As equações e interpretações para as razões iônicas

estão dispostas na Tabela 2.

Tabela 2 - Equações e classificações para Razões Iônicas.

Razões	Faixa de valores	Interpretação
Cl <sup>-</sup> /HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,5	Fluxo normal para rochas cristalinas <sup>1</sup>
	0,4 a 0,5	Águas continentais <sup>1</sup>
	20 a 50	Água do mar <sup>1</sup>
Cl <sup>-</sup> /∑ânions	> 0,8 e SDT > 500	Água do mar, salmoura ou evaporitos <sup>5</sup>
	> 0,8 e SDT < 100	Água de chuva <sup>5</sup>
	< 0,8	Intemperismo de rocha <sup>5</sup>
Na <sup>+</sup> /Cl <sup>-</sup>	> 1,4	Trocas iônicas normais, lixiviado mineral
	> 1 e < 1,4	Água em fluxo subsuperficial <sup>2,3,4</sup>
	< 1	Trocas reversas, tempo de residência longo o suficiente para estabelecer equilíbrio com aluminossilicatos secundários <sup>2,3,4</sup>
	= 1	Halita em solução <sup>2,3,4</sup>
	0,86 a 1,0	Precipitação de origem marinha <sup>2,3,4</sup>
Mg <sup>2+</sup> /Ca <sup>2+</sup>	≈ 1	Influência de terrenos dolomíticos <sup>5</sup>
	> 1	Associação de silicatos magnesianos <sup>5</sup>
	0,3 a 1,5	Águas continentais <sup>5</sup>

Fonte: Modificado de Hem<sup>1</sup> (1985), Tellam, Lloyd e Walters<sup>2</sup> (1986), Beaucaire *et al.*<sup>3</sup> (1999), Appelo e Postma<sup>4</sup> (1999), Hounslow<sup>5</sup> (1995), Custódio e Llamas (1983) apud Manassés (2009).

### 3.4.1.2 Índices Cloro-alcálinos

Os Índices Cloro-alcálinos são calculados e interpretados conforme a Tabela 3.

Tabela 3 - Equações e interpretação dos Índices Cloro-alcálinos.

Equações	Valor	Interpretação
CAI-I = $[\text{Cl}^- - (\text{Na}^+ + \text{K}^+)]/\text{Cl}^-]$	> 0	Troca iônica reversa
CAI-II = $[\text{Cl}^- - (\text{Na}^+ + \text{K}^+)]/[\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-} + \text{NO}_3^{2-}]$	> 0	
CAI-I = $[\text{Cl}^- - (\text{Na}^+ + \text{K}^+)]/\text{Cl}^-]$	< 0	Troca iônica
CAI-II = $[\text{Cl}^- - (\text{Na}^+ + \text{K}^+)]/[\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-} + \text{NO}_3^{2-}]$	< 0	

Fonte: ZAIDI *et al.* (2015).

Em que:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NO}_3^{2-}$  e  $\text{CO}_3^{2-}$  representam a concentração de sódio, cloreto, bicarbonato, nitrato e carbonato, respectivamente, em miliequivalentes por litro (meq/L).

#### 3.4.1.3 Diagrama de Gibbs

O diagrama de Gibbs (1970) foi realizado com o auxílio do *software Microsoft Excel*, no qual foram inseridos os dados STD (sólidos totais dissolvidos), razões aniônicas e catiônicas, essas duas últimas computadas conforme as equações 1 e 2.

$$\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+}) \quad (1)$$

$$\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-) \quad (2)$$

Em que:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  e  $\text{HCO}_3^-$  representam a concentração de sódio, cloreto e bicarbonato, respectivamente, em miliequivalentes por litro (meq/L).

#### 3.4.1.4 Índice de Saturação de Langelier

Esse índice compara o pH da água de interesse com o pH da água de saturação (pHs) para o carbonato de cálcio através da equação 3 (LANGELIER, 1936):

$$\text{LSI} = \text{pH} - \text{pHs} \quad (3)$$

Em que: pH é medido na amostra de água e pHs é o pH de saturação do carbonato, que deve ser calculado por meio das equações 4 a 8:

$$\text{pHs} = (9,3 + A + B) - (C + D) \quad (4)$$

$$A = \frac{(\log[\text{STD}] - 1)}{10} \quad (5)$$

$$B = -13,12 \cdot [\log(T + 273,15)] + 34,55 \quad (6)$$

$$C = \log[\text{Ca}^{2+}] - 0,4 \quad (7)$$

$$D = \log[\text{Alc}] \quad (8)$$

Em que: [STD] é a concentração de sólidos dissolvidos totais em mg/L, T é a

temperatura da água em °C,  $[Ca^{2+}]$  é a concentração de  $Ca^{2+}$  em mg  $CaCO_3/L$  e  $[Alc]$  é a alcalinidade em mg  $CaCO_3/L$ . A interpretação dos valores do LSI está descrita na Tabela 4.

Tabela 4 – Interpretação do Índice de Saturação de Langelier.

Valor do LSI	Interpretação
< 0	Supersaturado, tende a precipitar $CaCO_3$
= 0	Saturado, $CaCO_3$ em equilíbrio
> 0	Subsaturado, tende estar $CaCO_3$ dissolvido

Fonte: DeZuane (1997).

#### 3.4.1.5 Carbonato de Sódio Residual

O Carbonato de Sódio Residual (CSR) foi calculado pela equação 9 abaixo (EATON, 1950):

$$CSR = ([HCO_3^-] + [CO_3^{2-}]) - ([Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]) \quad (9)$$

Em que:  $[HCO_3^-]$ ,  $[CO_3^{2-}]$ ,  $[Ca^{2+}]$  e  $[Mg^{2+}]$  são as concentrações de bicarbonato, carbonato, cálcio e magnésio, respectivamente, em meq/L.

Tabela 5 - Classificação do Carbonato de Sódio Residual.

Valor do CSR	Classificação
< 1,25	Boa
1,25 - 2,5	Regular
> 2,5	Ruim

Fonte: Richards (1954).

#### 3.4.1.6 Razão de Adsorção do Sódio

O Risco de Adsorção de Sódio (RAS) foi calculado conforme a equação 10:

$$RAS = \frac{[Na^+]}{\sqrt{([Ca^{2+}] + [Mg^{2+}])/2}} \quad (10)$$

Em que:  $[Na^+]$ ,  $[Ca^{2+}]$  e  $[Mg^{2+}]$  representam a concentração de sódio, cálcio e magnésio, respectivamente, em miliequivalentes por litro (meq/L).

O diagrama proposto pelo Laboratório de Salinidade dos Estados Unidos (USSL)

considera a condutividade elétrica (CE) como indicadora do perigo de salinização do solo e a RAS como indicadora do risco de sodificação (ARAÚJO NETO *et al.*, 2015). Este diagrama foi construído no *software* livre QualiGraf, programa desenvolvido pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME).

Para classificar propõe 16 classes de água possíveis, nessa classificação a CE representa o risco de salinização (C) e a RAS o risco de sodificação (S), por meio da combinação de letras e números indicados na Tabela 6 (USDA, 1954):

Tabela 6 – Classificação das águas segundo USSL.

<b>Classe</b>	<b>Interpretação</b>	<b>Classe</b>	<b>Interpretação</b>
C1	Água de baixa salinidade	S1	Água fracamente sódica
C2	Água de média salinidade	S2	Água medianamente sódica
C3	Água com salinidade alta	S3	Água altamente sódica
C4	Água de salinidade muito alta	S4	Água extremamente sódica

Fonte: USDA (1954).

#### 3.4.1.7 Classificação das águas do reservatório

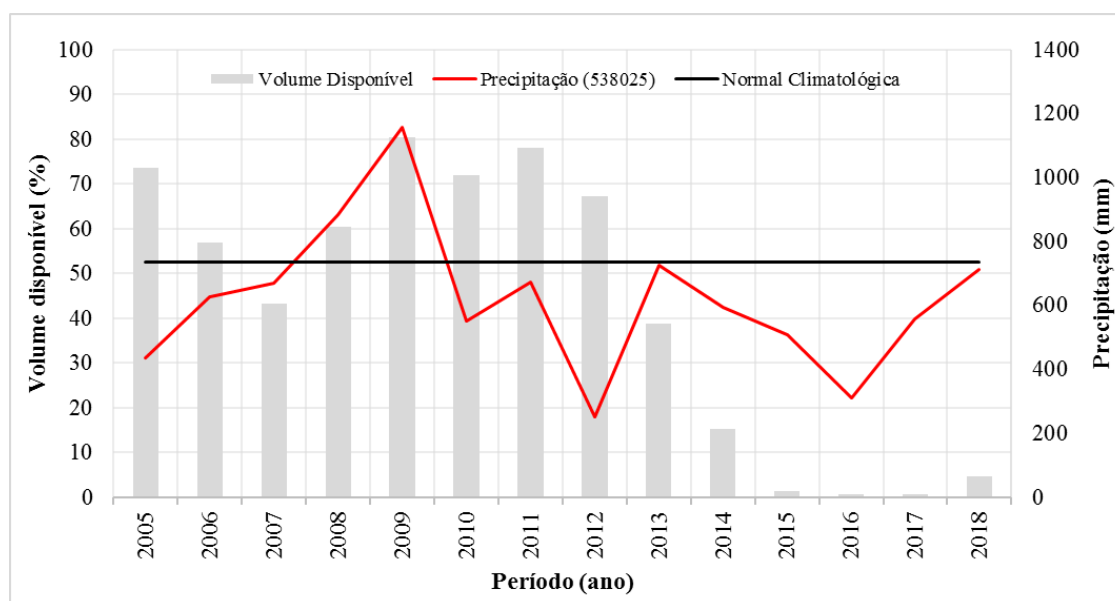
O diagrama de Piper foi construído através do *software* livre QualiGraf, programa desenvolvido pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) voltado para a interpretação gráfica de dados hidroquímicos. Os dados inseridos no programa foram: Na<sup>+</sup> (sódio), Ca<sup>2+</sup> (cálcio), Mg<sup>2+</sup> (magnésio), K<sup>+</sup> (potássio), Cl<sup>-</sup> (cloreto), HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (bicarbonato) e sulfato (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Caracterização do período de estiagem

Os dados das precipitações anuais, dos volumes disponíveis do reservatório Banabuiú e da normal climatológica são apresentados no Gráfico 1. A região do reservatório possuiu precipitações com alta variabilidade no tempo, com precipitação menor de 251,9 mm em 2018 e maior de 1158,6 mm em 2009, bem como uma normal climatológica de 734,9 mm. O reservatório passou por dois períodos de estiagem durante o tempo de estudo, um curto de 2005 a 2007, outro prolongado de 2010 a 2018. O período de estiagem prolongada reduziu severamente o volume disponível de 72,1 a 0,6% devido às precipitações pluviométricas abaixo da normal climatológica, que diminuíram o valor do aporte de água em direção ao açude.

Gráfico 1 - Variação de volume e precipitação no reservatório Banabuiú.



Fonte: elaborado pela autora.

De acordo com os dados da estação Quixeramobim (Código 82586) extraídos do portal do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a menor evaporação de 2168,9 mm ocorreu em 2005 e a maior de 4242,8 mm em 2012, bem como obteve uma média de 3041,2 mm entre 2005 e 2018. Diante disso, a região do reservatório apresentou valores maiores de evaporação em relação às precipitações.

## 4.2 Hidroquímica

Os parâmetros utilizados e a estatística descritiva desses parâmetros estão dispostos na Tabela 7, em que  $s$  corresponde ao desvio-padrão.

Tabela 7 – Estatística descritiva dos parâmetros de qualidade.

Parâmetro	Média	Mediana	Desvio-padrão	Mínimo	Máximo	1º Quartil	3º Quartil
<b>pH</b>	8.1	8.0	0.4	7.3	9.0	8.0	8.2
<b>Na<sup>+</sup> (mg/L)</b>	53.8	49.4	18.7	25.0	88.4	49.4	67.1
<b>K<sup>+</sup> (mg/L)</b>	11.6	11.4	3.3	6.2	18.2	11.4	14.0
<b>Ca<sup>2+</sup> (mg/L)</b>	27.1	25.4	6.3	19.2	48.2	25.4	26.9
<b>Mg<sup>2+</sup> (mg/L)</b>	21.2	17.1	8.7	13.1	41.6	17.1	24.5
<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (mg/L)</b>	154.5	149.2	12.3	132.8	192.7	149.2	161.5
<b>CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> (mg/L)</b>	1.2	0.7	1.4	0.1	7.2	0.7	1.1
<b>Cl<sup>-</sup> (mg/L)</b>	83.8	67.3	37.0	31.7	168.5	67.3	107.0
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (mg/L)</b>	12.5	13.3	8.0	4.6	36.3	13.3	13.3
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (mg/L)</b>	0.6	0.4	0.4	0.1	1.5	0.4	0.7
<b>CE (µS/cm)</b>	529.7	432.5	259.2	290.0	1203.0	432.5	650.5
<b>STD (mg/L)</b>	75.0	78.3	9.9	50.8	90.4	78.3	82.1

Fonte: elaborada pela autora.

O potencial hidrogeniônico (pH) apresenta uma faixa de variação de 7,3 a 9,0 e média de 8,1, manteve-se completamente alcalino durante o período observado. Os sólidos totais dissolvidos (STD) variaram de 50,8 a 90,4 mg/L e obtiveram uma média de 75 mg/L. Por outro lado, a condutividade elétrica apresentou valor mínimo de 290,0 µS/cm, valor máximo de 1203,0 µS/cm e média de 529,7 µS/cm.

Em relação aos ânions, os resultados para o bicarbonato apresentaram a maior média de 154,5 mg/L e variaram numa faixa entre 132,8 e 192,7 mg/L. Contudo, a menor média de 0,6 mg/L pertenceu ao nitrato que variou entre 0,1 e 1,5 mg/L. Os desvios-padrões em ordem decrescente correspondem ao cloreto ( $s = 37,0$ ), bicarbonato ( $s = 12,3$ ), sulfato ( $s = 8,0$ ), carbonato ( $s = 1,4$ ) e nitrato ( $s = 0,4$ ).

Dentre os cátions, o sódio apresentou a maior média de 53,8 mg/L e variou de 25 a 88,4 mg/L. Por outro lado, os resultados para o potássio possuíram a menor média de 11,6 mg/L

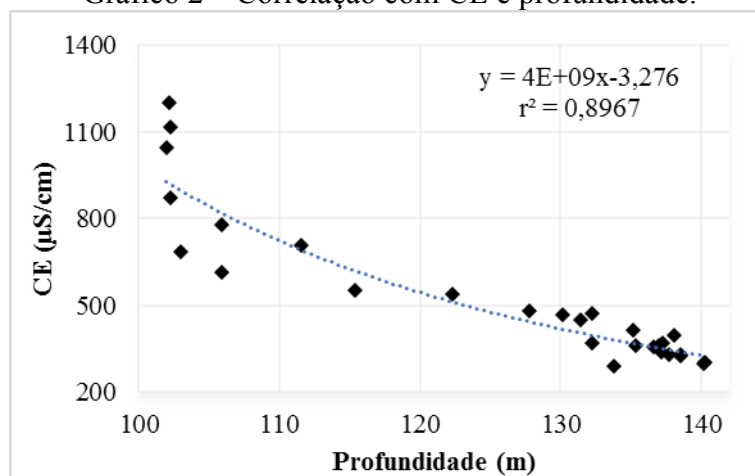
e estiveram no intervalo de 6,2 a 18,2 mg/L. Os valores de desvio-padrão em ordem decrescente são determinados pelo sódio ( $s = 18,7$ ), magnésio ( $s = 8,7$ ), cálcio ( $s = 6,3$ ) e potássio ( $s = 3,3$ ).

#### 4.2.1 Variação do volume hídrico disponível no açude do estudo

Após realizar correlações *Pearson* para todos parâmetros de qualidade (Tabela 7), profundidade (m), volume ( $\text{hm}^3$ ), volume disponível (%), precipitação (mm) e evaporação (mm), destacaram-se parâmetros que estão plotados nos Gráficos 2 a 11.

A correlação muito forte ( $r = 0,947$ ) entre condutividade elétrica (CE) e profundidade do reservatório (profundidade) indica a influência do aumento do volume decorrente da precipitação na diluição dos sais (Gráfico 2). Constatou-se esta relação nas bacias hidrográficas do Acaraú, Coreau, Parnaíba, Salgado e Alto Jaguaribe ao associar a ocorrência de reservatórios com baixas salinidades em regiões de maiores precipitações (ARAÚJO NETO *et al.*, 2014). Outro efeito indicado pela correlação é que a redução do volume do açude influencia na concentração de sais na água. Alguns estudos realizados nos reservatórios do semiárido apontaram a evaporação como o fator principal da redução do volume e da intensificação do processo de salinização (SANTIAGO, 1984; MEIRELES; FRISCHKORNS; ANDRADE, 2007).

Gráfico 2 – Correlação com CE e profundidade.



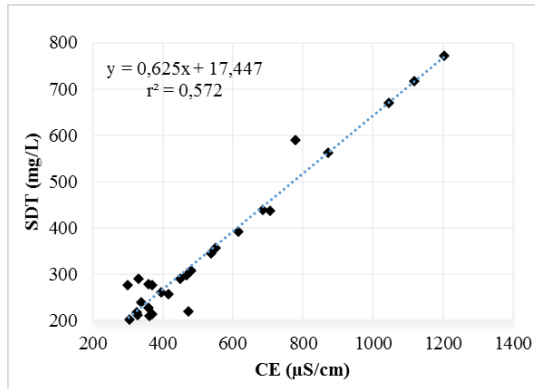
Fonte: elaborado pela autora.

Os sólidos totais dissolvidos (STD) e a condutividade elétrica (CE) também tiveram uma correlação muito forte ( $r = 0,978$ ), o que aponta para a contribuição significativa do conteúdo iônico na composição dos STD (Gráfico 3). Esta observação associada à ótima correlação entre STD e profundidade ( $r = 0,924$ ) contribuiu novamente para influência do volume como fator de concentração durante a estiagem e fator diluição nos períodos de maior



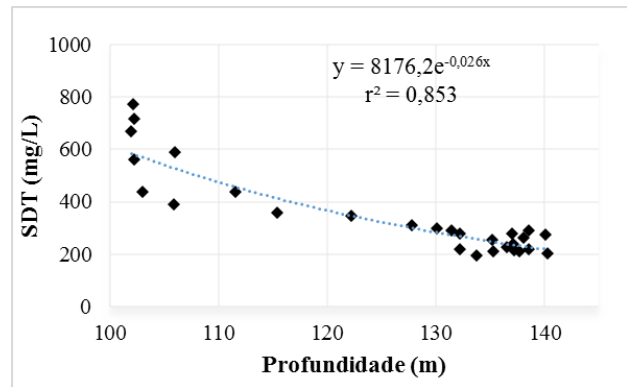
aporte de água dos sólidos encontrados na água (Gráfico 4).

Gráfico 3 – Correlação com sólidos totais dissolvidos e CE.



Fonte: elaborado pela autora.

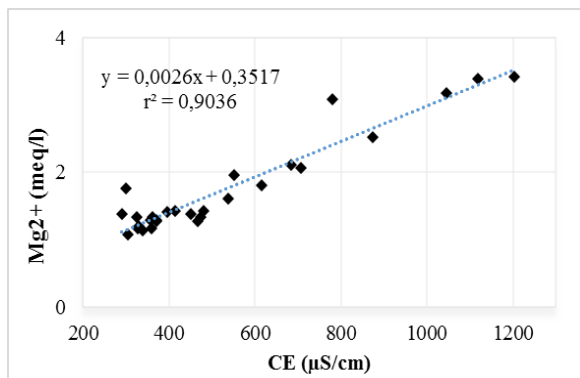
Gráfico 4 – Correlação com sólidos totais dissolvidos e profundidade.



Fonte: elaborado pela autora.

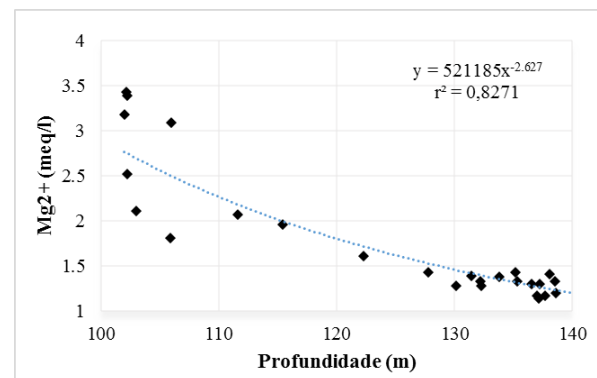
A correlação muito forte ( $r = 0,951$ ) entre condutividade elétrica e magnésio ( $Mg^{2+}$ ) indica a contribuição deste cátion para a composição iônica (Gráfico 5), enquanto que magnésio com profundidade ( $r = 0,909$ ) indicou a atuação do volume disponível como agente de concentração e diluição para esse cátion (Gráfico 6).

Gráfico 5 – Correlação com magnésio e CE.



Fonte: elaborado pela autora.

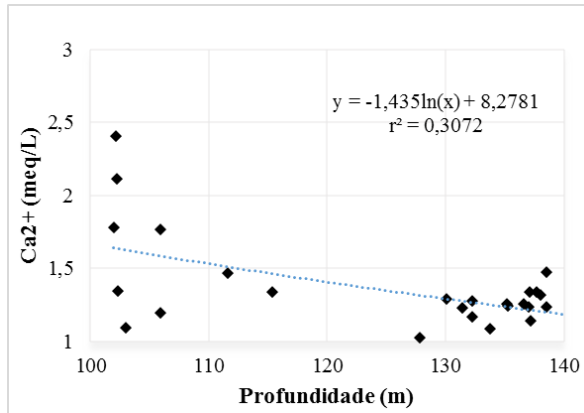
Gráfico 6 – Correlação com magnésio e profundidade.



Fonte: elaborado pela autora.

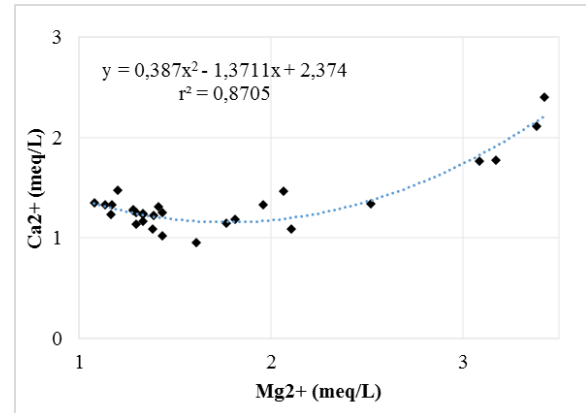
A profundidade do reservatório com cálcio ( $Ca^{2+}$ ) obteve correlação média ( $r = 0,554$ ), o que indica a ação de outros processos em suas variações (Gráfico 7). O aumento da concentração de cálcio e magnésio na água pode estar relacionado a dissolução de calcita e dolomita (OZLER, 2009). Portanto, no período de volumes menores a dolomita ( $CaMg(CO_3)_2$ ) e calcita ( $CaCO_3$ ) poderiam ser encontradas nas formas dissolvidas durante o período estudado.

Gráfico 7 – Correlação com cálcio e profundidade.



Fonte: elaborado da pela autora.

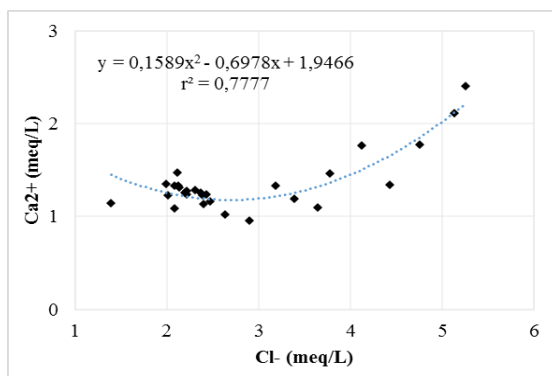
Gráfico 8 – Correlação com cálcio e magnésio.



Fonte: elaborado pela autora.

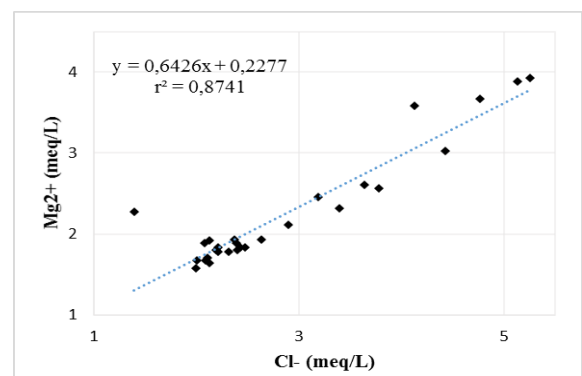
Por outro lado, quando magnésio e cálcio possuem correlações significantes com o cloreto associado ao aumento das concentrações e da salinidade, estas condições sugerem o aumento da troca catiônica do sódio por cálcio e magnésio (SAMI, 1992). Nas águas do reservatório Banabuiú foram verificadas correlação muito forte entre cálcio e magnésio ( $r = 0,933$ ) (Gráfico 8), correlação forte do cálcio com cloreto ( $r = 0,882$ ) (Gráfico 9) e correlação forte entre magnésio e cloreto ( $r = 0,935$ ), o que indicaram a ocorrência de trocas iônicas nas águas do Banabuiú.

Gráfico 9 – Correlação com cálcio e cloreto.



Fonte: elaborado pela autora.

Gráfico 10 – Correlação com magnésio e cloreto.



Fonte: elaborado pela autora.

#### 4.2.2 Variações do caráter hidroquímico das águas dos açudes

A Tabela 8 apresenta a dominância dos íons em cada semestre, na qual foi possível identificar diferentes tipos de composição aniônica e catiônica. As hierarquias verificadas para cátions foram:  $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$  e  $\text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$ . As hierarquias determinadas pelos ânions foram:  $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{CO}_3^{2-} > \text{NO}_3^-$ ;  $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{CO}_3^{2-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$ ;  $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{CO}_3^{2-} > \text{NO}_3^-$ ;  $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{CO}_3^{2-}$ . Os efeitos da estiagem mudaram a dominância da composição aniônica do bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) para cloreto ( $\text{Cl}^-$ ), como consequência o cloreto predominou do 1º semestre de 2015 ao 2º semestre de 2018. Por outro lado, o sódio continuou como íon dominante na maioria dos semestres exceto no 1º semestre de 2006, 2º semestre de 2011 e 1º semestre de 2018 quando o magnésio superou sua concentração. Durante a estiagem prolongada predominou  $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$  para cátions e  $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{CO}_3^{2-} > \text{NO}_3^-$  para ânions.

Tabela 8 – Hierarquia da dominância de cátions e ânions.

(continua)

Ano/Sem.	Cátions				Ânions				
	1º	2º	3º	4º	1º	2º	3º	4º	5º
2005.1	$\text{Na}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{K}^+$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{CO}_3^{2-}$	$\text{NO}_3^-$
2005.2	$\text{Na}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{K}^+$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{CO}_3^{2-}$	$\text{NO}_3^-$
2006.1	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{CO}_3^{2-}$	$\text{NO}_3^-$
2006.2	$\text{Na}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{K}^+$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{CO}_3^{2-}$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{NO}_3^-$
2007.1	$\text{Na}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{K}^+$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{CO}_3^{2-}$	$\text{NO}_3^-$
2007.2	$\text{Na}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{K}^+$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{CO}_3^{2-}$	$\text{NO}_3^-$
2008.1	$\text{Na}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{K}^+$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{NO}_3^-$	$\text{CO}_3^{2-}$
2008.2	$\text{Na}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{K}^+$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{NO}_3^-$	$\text{CO}_3^{2-}$
2009.1	$\text{Na}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{K}^+$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{CO}_3^{2-}$	$\text{NO}_3^-$
2009.2	$\text{Na}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{K}^+$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{CO}_3^{2-}$	$\text{NO}_3^-$
2010.1	$\text{Na}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{K}^+$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{CO}_3^{2-}$	$\text{NO}_3^-$
2010.2	$\text{Na}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{K}^+$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{CO}_3^{2-}$	$\text{NO}_3^-$
2011.1	$\text{Na}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{K}^+$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{NO}_3^-$	$\text{CO}_3^{2-}$
2011.2	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{K}^+$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{CO}_3^{2-}$	$\text{NO}_3^-$
2012.1	$\text{Na}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{K}^+$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{CO}_3^{2-}$	$\text{NO}_3^-$

(conclusão)

Ano/Sem.	Cátions				Ânions				
	1º	2º	3º	4º	1º	2º	3º	4º	5º
2012.2	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
2013.1	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
2013.2	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>
2014.1	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
2014.2	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
2015.1	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
2015.2	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
2016.1	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
2016.2	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
2017.1	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
2017.2	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
2018.1	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
2018.2	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>

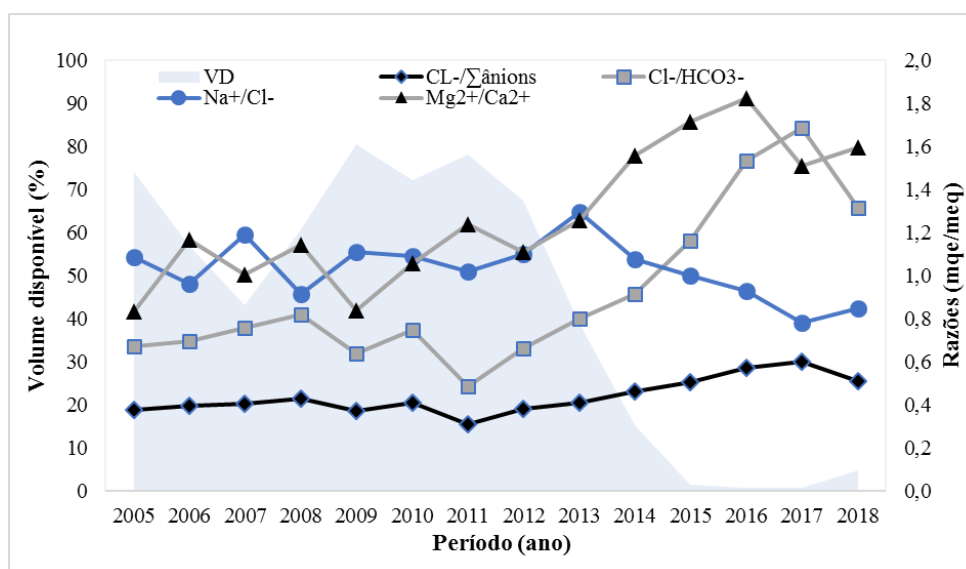
Fonte: elaborado pela autora.

### 4.2.3 Razões iônicas

#### 4.2.3.1 Variação interanual

Os resultados das razões entre o cloreto e o somatório dos ânions ( $\text{Cl}^-/\sum\text{ânions}$ ), cloreto e bicarbonato ( $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ ), sódio e cloreto ( $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$ ) e magnésio e cálcio ( $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ ) nos períodos anuais estão no Gráfico 11, que relaciona as razões com a variação do volume disponível (VD) do reservatório Banabuiú.

Gráfico 11 – Variação anual das razões em relação ao volume disponível.



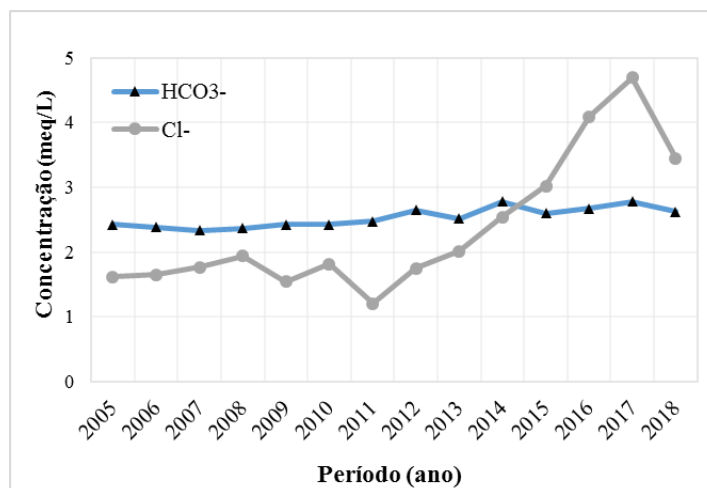
Fonte: elaborado pela autora.

Os resultados do cômputo da razão  $\text{Cl}^-/\sum\text{ânions}$  variaram no intervalo entre 0,31 a 0,60, apresentaram um desvio-padrão de 0,08 e uma média de 0,44. Por outro lado, a razão  $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$  variou de 0,49 a 1,69 com um desvio-padrão de 0,78 e um valor médio de 0,92. Em relação a razão  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$ , os resultados estiveram entre os valores de 0,78 e 1,29, acompanhados de desvio padrão e média, de 0,14 e 1,03, respectivamente. A razão  $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$  apresentou uma média de 1,20, variando de 1,20 a 1,82 e um desvio padrão de 0,32.

Conforme o Gráfico 11, valores máximos das razões  $\text{Cl}^-/\sum\text{ânions}$  e  $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$  ocorreram em 2017 associados ao menor volume do reservatório de 9,97 hm<sup>3</sup> (0,62%). Por outro lado, os valores mínimos dessas razões ocorreram em 2011, período em que o reservatório possuía o terceiro maior volume (80,34%). O aumento significativo da razão  $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$  entre 2011 e 2017 ocorreu devido ao aumento da concentração do cloreto, como consequência contribuiu para a variação da razão  $\text{Cl}^-/\sum\text{ânions}$  no período de estiagem (Gráfico 12). O cloreto é um excelente indicador do efeito da estiagem, pois apresenta dificuldade de precipitar devido

a sua alta solubilidade, não adsorção de forma significativa por superfícies minerais, mínima participação nas funções bioquímicas vitais, bem como não entram consideravelmente em processos de oxidação e redução (HEM, 1985).

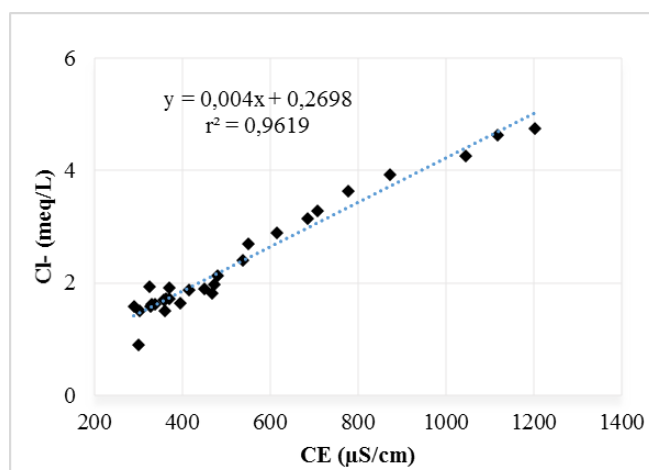
Gráfico 12 – Variação anual da concentração de bicarbonato e cloreto.



Fonte: elaborado pela autora.

A relação direta entre  $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$  e CE também foi verificada em outros reservatórios do Nordeste (LEPRUN, 1983; SILVA JÚNIOR, GHEYI; MEDEIROS, 1999). Essa constatação evidencia o comportamento da concentração cloreto com o avanço da salinização, bem como pode ser observado na correlação muito forte ( $r = 0,971$ ) entre cloreto e CE (Gráfico 13).

Gráfico 13 – Correlação com cloreto e CE.

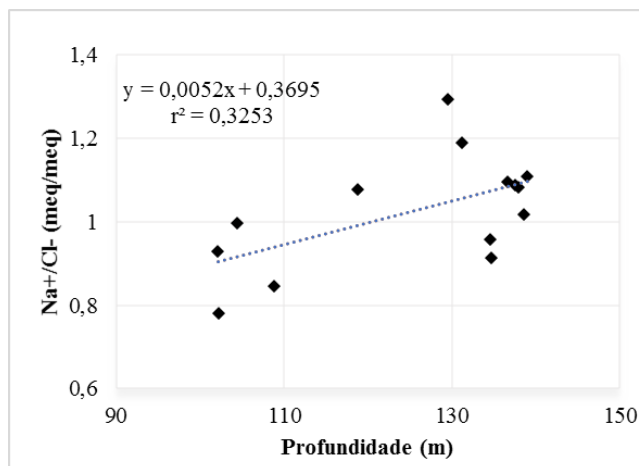


Fonte: elaborado pela autora.

Os resultados da razão  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  atingiram valores iguais ou superiores a 1 nos anos de 2005, 2007 e 2009 a 2015 (Gráfico 11), portanto indicaram a relativa predominância do

sódio em relação ao cloreto de acordo com as variações interanuais. A razão  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  e a profundidade resultaram numa correlação média ( $r = 0,571$ ), dessa forma existem outros processos atuantes nas variações da concentração do sódio (Gráfico 14). Isso é observado principalmente entre 2005 e 2011, pois a razão  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  apresentou concentrações variáveis e sugeriu a ocorrência de processos como troca iônica e formação de sais.

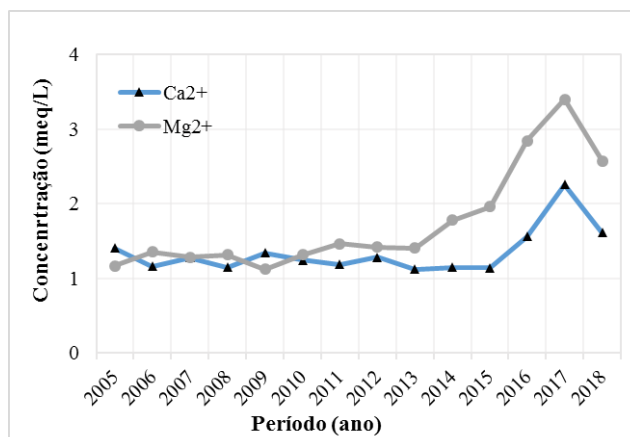
Gráfico 14 – Correlação com razão  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  e profundidade.



Fonte: elaborado pela autora.

A razão  $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$  variou alternadamente entre o relativo predomínio do cálcio e do magnésio até 2010, momento no qual o magnésio iniciou seu processo de acumulação significativa e o cálcio iniciou esse processo acentuadamente a partir de 2015 (Gráfico 15). Portanto, essas constatações implicam na ocorrência do acúmulo desses íons durante o período de estiagem prolongada. A partir de 2017, as concentrações de cálcio e magnésio diminuíram, o que apontam que este fato pode estar associado às trocas iônicas e às precipitações de sais (Gráfico 15). Além disso, nesse período todas as razões estudadas adquiriram uma nova tendência, provavelmente devido à renovação das águas decorrentes incremento de volume (Gráfico 12).

Gráfico 15 - Variação anual da concentração de cálcio e magnésio.



Fonte: elaborado pela autora.

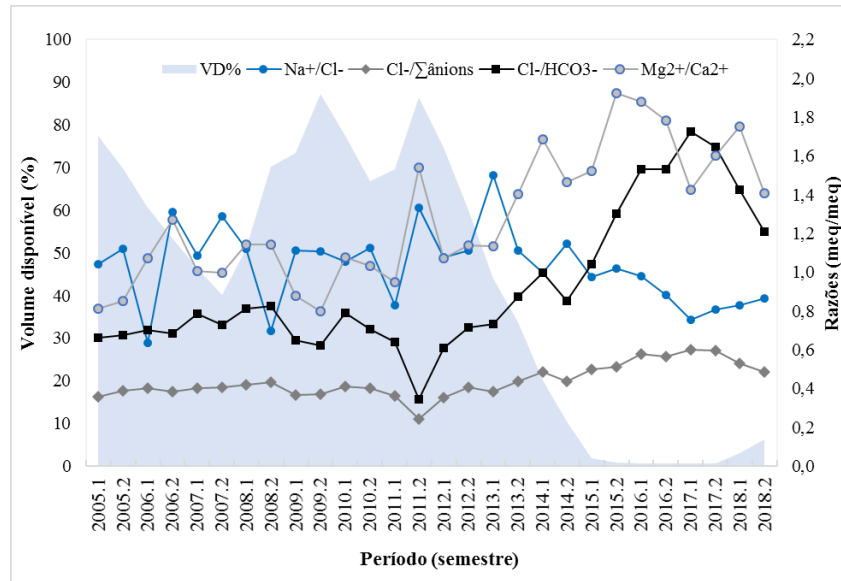
#### 4.2.3.2 Variação semestral e interpretação das Razões Iônicas

Alguns processos não são passíveis de observação no passo de tempo anual, portanto as variações das razões de cada semestre estão apresentadas no Gráfico 16, indicando uma maior variabilidade maior das razões durante o período do estudo.

Os resultados da  $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$  não foram enquadrados dentro dos intervalos de classificação mostrados na Tabela 2. Outros autores que utilizaram estes critérios de classificação também não conseguiram enquadrar os valores, como Manassés (2009) e Granjeiro *et al.* (2009). Verifica-se nas razões  $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$  e  $\text{Cl}^-/\sum \text{ânions}$  tendências acumulativas do cloreto a partir do 2º semestre de 2011, o que aponta a influência do período de estiagem (Gráfico 16). Quando o volume atingiu menos de 10% o predomínio do cloreto sobre o bicarbonato foi observado através da razão  $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ .



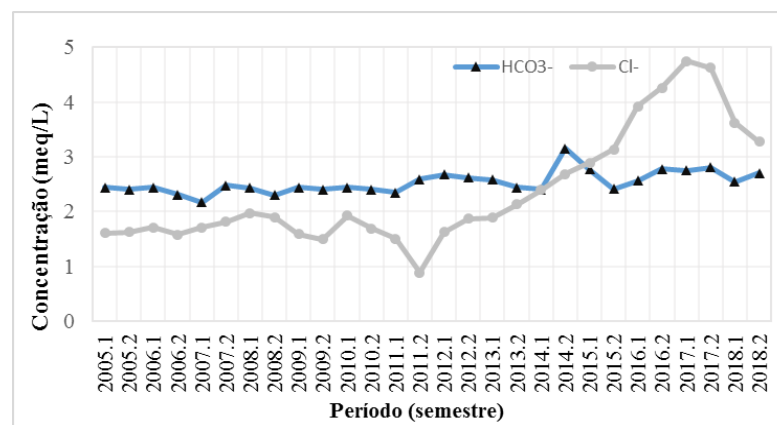
Gráfico 16 - Variação semestral das razões iônicas em relação ao volume.



Fonte: elaborado pela autora.

Os valores  $Cl^-/\Sigma\text{ânions}$  todos foram menores que 0,8, dessa forma o intemperismo de rochas está associado a origem dos sais conforme exposto na Tabela 2. Em seus estudos Falcão e Leal (1989) concluíram que os índices de cloreto entram em conflito com a natureza litológica do cristalino, pois não possui capacidade suficiente de liberar através da decomposição química altos índices desses sais. Como as correlações da profundidade com  $Cl^-/\Sigma\text{ânions}$  ( $r = 0,908$ ) e  $Cl^-/HCO_3^-$  ( $r = 0,931$ ) foram muito fortes, isso indica que o fator dominante para o aumento cloretos e da razão  $Cl^-/HCO_3^-$  está associado à redução do volume (Gráfico 18 e 19). Além disso, a concentração de bicarbonatos não possuiu efeito acumulativo como o cloreto (Gráfico 17). Por outro lado, foi levantada a possível ação do intemperismo nas formações rochosas com liberação de carbonatos (COSTA; MELO; SILVA, 2005).

Gráfico 17 - Variação semestral da concentração de bicarbonato e cloreto.



Fonte: elaborado pela autora.



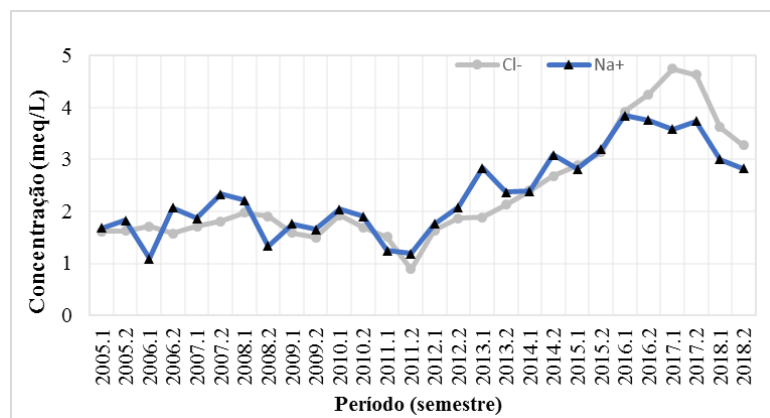
UDOM, 2011).

Tabela 9 – Interpretação dos resultados da razão iônica Na<sup>+</sup>/Cl<sup>-</sup>.

Ano/Sem.	Na <sup>+</sup> /Cl <sup>-</sup>	Classificação	Ano/Sem.	Na <sup>+</sup> /Cl <sup>-</sup>	Classificação
2005.1	1,0	Dissolução de halita	2012.1	1,1	Água em fluxo subsuperficial
2005.2	1,1	Água em fluxo subsuperficial	2012.2	1,1	Água em fluxo subsuperficial
2006.1	0,6	Troca reversas	2013.1	1,5	Troca iônica normal
2006.2	1,3	Água em fluxo subsuperficial	2013.2	1,1	Água em fluxo subsuperficial
2007.1	1,1	Água em fluxo subsuperficial	2014.1	1,0	Dissolução de halita
2007.2	1,3	Água em fluxo subsuperficial	2014.2	1,1	Água em fluxo subsuperficial
2008.1	1,1	Água em fluxo subsuperficial	2015.1	1,0	Dissolução de halita
2008.2	0,7	Troca reversas	2015.2	1,0	Dissolução de halita
2009.1	1,1	Água em fluxo subsuperficial	2016.1	1,0	Dissolução de halita
2009.2	1,1	Água em fluxo subsuperficial	2016.2	0,9	Trocas reversas
2010.1	1,1	Água em fluxo subsuperficial	2017.1	0,8	Trocas reversas
2010.2	1,1	Água em fluxo subsuperficial	2017.2	0,8	Trocas reversas
2011.1	0,8	Troca reversas	2018.1	0,8	Trocas reversas
2011.2	1,3	Água em fluxo subsuperficial	2018.2	0,9	Trocas reversas

Fonte: elaborada pela autora.

Gráfico 20 – Variação semestral do cloreto e sódio.



Fonte: elaborado pela autora.

Os resultados da razão  $Mg^{2+}/Ca^{2+}$  são apresentados na Tabela 10. Indicam que 46,43% das amostras possuem características de águas continentais, 42,86% foram influenciados por terrenos dolomíticos e 10,71% estiveram associados aos silicatos magnesianos. Durante o período de estiagem nas águas do reservatório predominaram as características de águas continentais, bem como os processos de incremento desses sais estiveram associados a influência de terrenos dolomíticos. Além desses, o intemperismo de carbonatos e silicatos são capazes de fornecer cálcio e magnésio na água (SINGH *et al.*, 2005).

Tabela 10 – Interpretação dos resultados da razão iônica  $Mg^{2+}/Ca^{2+}$ .

Ano/Sem.	$Mg^{2+}/Ca^{2+}$	Classificação	Ano/Sem.	$Mg^{2+}/Ca^{2+}$	Classificação
2005.1	1,0	Silicatos magnesianos	2012.1	0,9	Terrenos dolomíticos
2005.2	1,1	Silicatos magnesianos	2012.2	0,9	Terrenos dolomíticos
2006.1	0,6	Terrenos dolomíticos	2013.1	0,9	Terrenos dolomíticos
2006.2	1,3	Terrenos dolomíticos	2013.2	0,7	Águas continentais
2007.1	1,1	Terrenos dolomíticos	2014.1	0,6	Águas continentais
2007.2	1,3	Terrenos dolomíticos	2014.2	0,7	Águas continentais
2008.1	1,1	Terrenos dolomíticos	2015.1	0,7	Águas continentais
2008.2	0,7	Terrenos dolomíticos	2015.2	0,5	Águas continentais
2009.1	1,1	Terrenos dolomíticos	2016.1	0,5	Águas continentais
2009.2	1,1	Silicatos magnesianos	2016.2	0,6	Águas continentais
2010.1	1,1	Terrenos dolomíticos	2017.1	0,7	Águas continentais
2010.2	1,1	Águas continentais	2017.2	0,6	Águas continentais
2011.1	0,8	Águas continentais	2018.1	0,6	Águas continentais
2011.2	1,3	Águas continentais	2018.2	0,7	Águas continentais

Fonte: elaborada pela autora.

#### 4.2.4 Índices Cloro-alcálinos

Os resultados dos Índices Cloro-alcálinos encontram-se na Tabela 11. Os valores médios obtidos para CAI-I e CAI-II foram -0,18 e -0,07, respectivamente, com 21 amostras semestrais positivas e 7 negativas. Os resultados do CAI-I variaram de -0,74 a 0,27 com desvio padrão de 0,25, enquanto os valores para CAI-II estiveram entre -0,29 e 0,12 com desvio padrão de 0,10.

Tabela 11 – Resultados dos Índices Cloro-alcálinos.

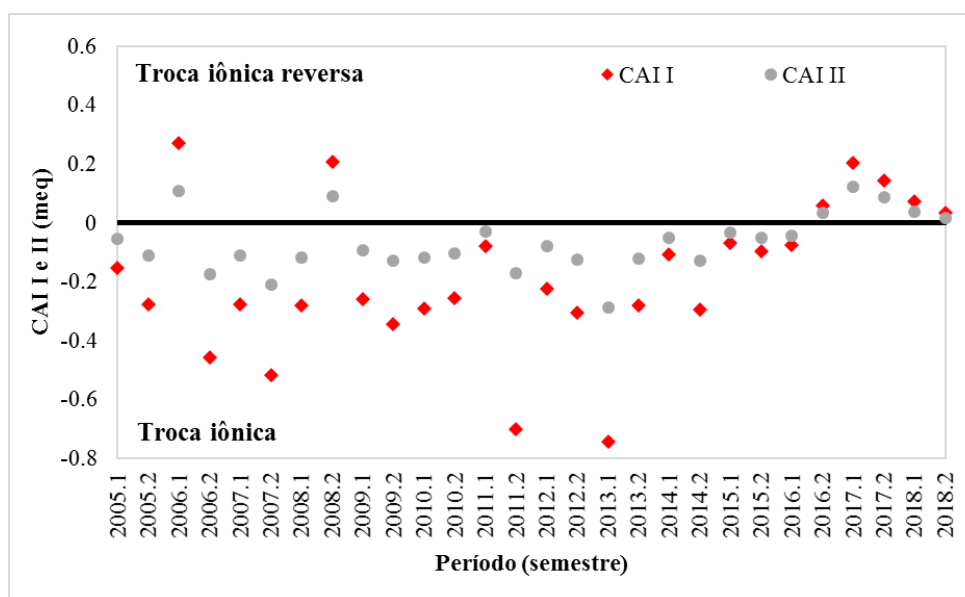
Ano	CAI I	CAI II	Ano	CAI I	CAI II
2005.1	-0,15	-0,05	2012.1	-0,22	-0,08
2005.2	-0,28	-0,11	2012.2	-0,30	-0,12
2006.1	0,27	0,11	2013.1	-0,74	-0,29
2006.2	-0,45	-0,18	2013.2	-0,28	-0,12
2007.1	-0,28	-0,11	2014.1	-0,11	-0,05
2007.2	-0,52	-0,21	2014.2	-0,29	-0,13
2008.1	-0,28	-0,12	2015.1	-0,07	-0,03
2008.2	0,21	0,09	2015.2	-0,10	-0,05
2009.1	-0,26	-0,09	2016.1	-0,08	-0,04
2009.2	-0,34	-0,13	2016.2	0,06	0,03
2010.1	-0,29	-0,12	2017.1	0,20	0,12
2010.2	-0,25	-0,10	2017.2	0,15	0,09
2011.1	-0,08	-0,03	2018.1	0,07	0,04
2011.2	-0,70	-0,17	2018.2	0,03	0,02

Fonte: elaborada pela autora.

Durante o período de estudo predominou a troca iônica, na qual os íons de cálcio e magnésio presentes nas águas são substituídos pelos íons de sódio e potássio pertencentes às rochas (Gráfico 21). Alguns períodos apresentaram CAI-I e CAI-II positivos como no 1º semestre de 2006, 2º semestre de 2008, bem como a partir do 2º semestre de 2016. Os processos de troca iônica ocorrem devido aos materiais como argilas, matéria orgânica e frações de siltes presentes no solo que possuem a capacidade de adsorver cátions na sua superfície, que por sua vez podem ser substituídos por cátions presentes na água (SANTIAGO, 1964). Em relação ao período de estiagem, as trocas foram predominantemente negativas, dessa forma a indicação de troca iônica reversa coincide com os resultados obtidos para a razão  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  a partir do 2º

semestre de 2016.

Gráfico 21 – Variação semestral dos Índices Cloro-alcalinos.



Fonte: elaborado pela autora.

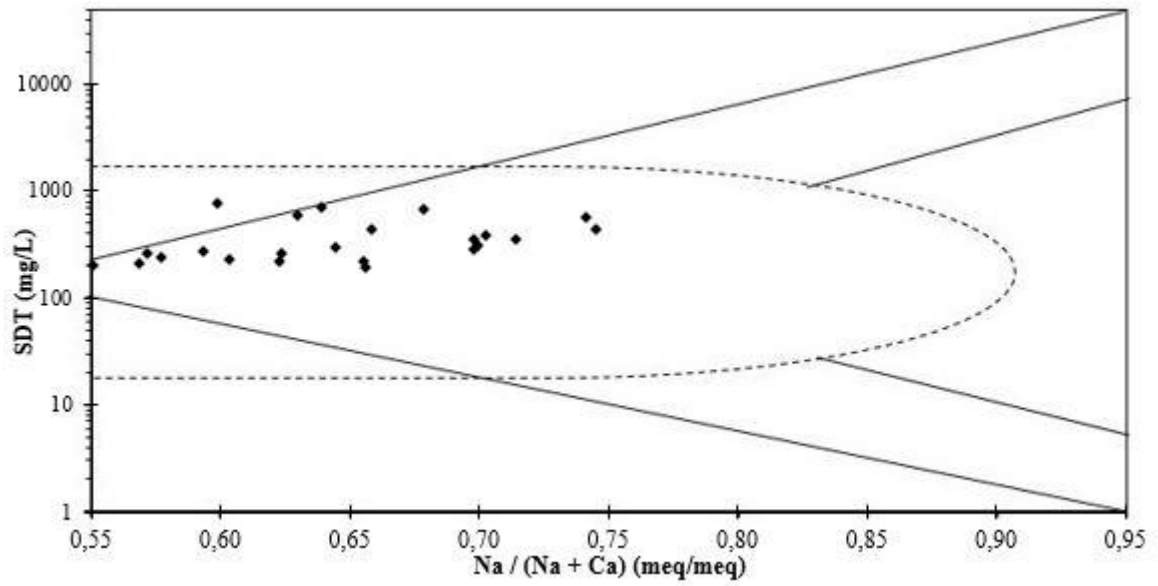
Observaram-se mudanças significativas nas composições no 1º semestre de 2006, no qual ocorreu troca iônica reversa houve uma mudança na dominância dos cátions de  $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$  para  $\text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$  e no 1º semestre de 2018 de  $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$  para  $\text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$ . Possivelmente, indica a influência das trocas iônicas ou reversas nesses períodos devido às concentrações variáveis de sódio, cálcio e magnésio.

#### 4.2.5 Diagrama de Gibbs

Os resultados do Diagrama de Gibbs para cátions e ânions são apresentados nas Figuras 2 e 3.

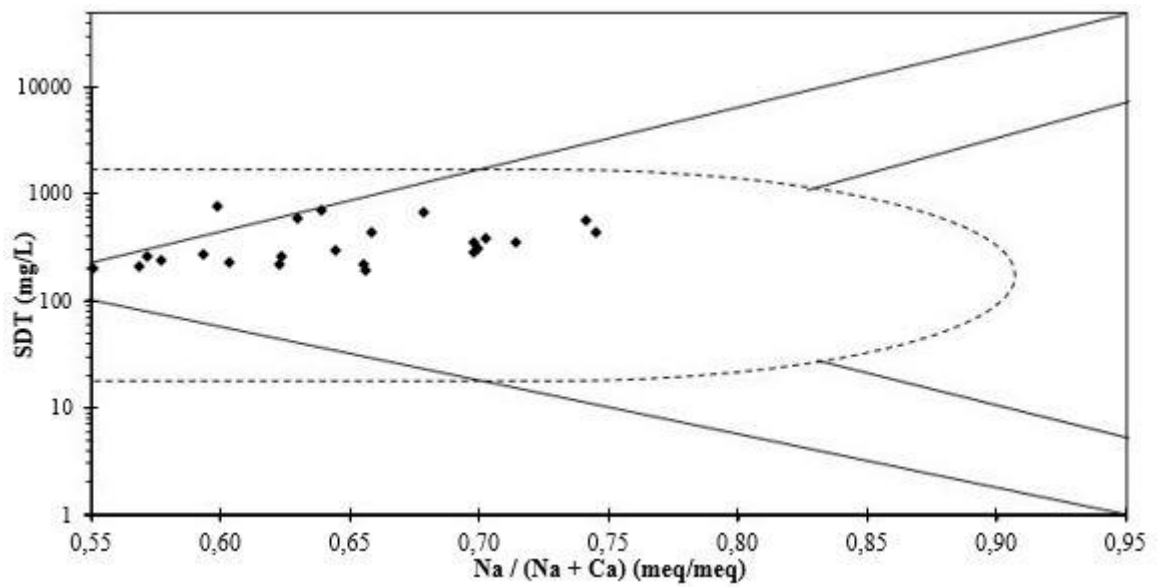
O processo dominante na origem da composição catiônica e aniônica é o intemperismo, que por sua vez está relacionado ao escoamento durante a precipitação sobre a bacia hidrográfica ao carrear íons para o reservatório (Figura 2). Lima *et al.* (2017) constatou por meio de Gibbs que o intemperismo foi o processo dominante para a composição catiônica e aniônica das águas do rio Cobras, localizado no semiárido. O estudo desenvolvido por Pereira *et al.* (2006) corrobora com os resultados anteriores ao verificar a dominância do intemperismo nos três reservatórios estudados no estado do Ceará.

Figura 2 – Resultado do diagrama de Gibbs para cátions.



Fonte: elaborada pela autora.

Figura 3 – Resultado do diagrama de Gibbs para ânions.



Fonte: elaborada pela autora.

#### 4.2.6 Índice de Saturação de Langelier

Os valores e as classificações são apresentados na Tabela 12. Os resultados para o ISL variaram de -2,45 a -0,51, com valor médio de -1,58 e um desvio padrão igual a 0,42.

Tabela 12 - Resultados e classificação do Índice de Langelier.

Ano/Sem.	LSI	Classificação	Ano/Sem.	LSI	Classificação
2005.1	-0.9	Subsaturação de CaCO <sub>3</sub>	2012.1	-1.4	Subsaturação de CaCO <sub>3</sub>
2005.2	-1.6	Subsaturação de CaCO <sub>3</sub>	2012.2	-1.9	Subsaturação de CaCO <sub>3</sub>
2006.1	-1.7	Subsaturação de CaCO <sub>3</sub>	2013.1	-1.1	Subsaturação de CaCO <sub>3</sub>
2006.2	-1.0	Subsaturação de CaCO <sub>3</sub>	2013.2	-1.8	Subsaturação de CaCO <sub>3</sub>
2007.1	-1.5	Subsaturação de CaCO <sub>3</sub>	2014.1	-1.9	Subsaturação de CaCO <sub>3</sub>
2007.2	-1.7	Subsaturação de CaCO <sub>3</sub>	2014.2	-1.8	Subsaturação de CaCO <sub>3</sub>
2008.1	-2.4	Subsaturação de CaCO <sub>3</sub>	2015.1	-1.6	Subsaturação de CaCO <sub>3</sub>
2008.2	-1.8	Subsaturação de CaCO <sub>3</sub>	2015.2	-1.3	Subsaturação de CaCO <sub>3</sub>
2009.1	-1.6	Subsaturação de CaCO <sub>3</sub>	2016.1	-1.6	Subsaturação de CaCO <sub>3</sub>
2009.2	-1.6	Subsaturação de CaCO <sub>3</sub>	2016.2	-0.5	Subsaturação de CaCO <sub>3</sub>
2010.1	-1.3	Subsaturação de CaCO <sub>3</sub>	2017.1	-1.6	Subsaturação de CaCO <sub>3</sub>
2010.2	-1.7	Subsaturação de CaCO <sub>3</sub>	2017.2	-1.1	Subsaturação de CaCO <sub>3</sub>
2011.1	-1.7	Subsaturação de CaCO <sub>3</sub>	2018.1	-1.4	Subsaturação de CaCO <sub>3</sub>
2011.2	-2.3	Subsaturação de CaCO <sub>3</sub>	2018.2	-2.3	Subsaturação de CaCO <sub>3</sub>

Fonte: elaborada pela autora.

Os resultados para o Índice de Langelier também indicaram uma subsaturação em calcita (LSI<0) durante todo o período avaliado, portanto a calcita (CaCO<sub>3</sub>) encontra-se dissolvida. Segundo Langelier (1936), as águas deficientes em carbonatos e cálcio são conhecidas por serem mais corrosivas, dessa forma as águas do Banabuiú tenderam a apresentar corrosividade. Verificou-se também a ocorrência de águas subsaturadas em CaCO<sub>3</sub> nos reservatórios Grutão do Carira, em Sergipe, por Silva *et al.* (2015) e Pentecoste, no Ceará, por Souza (2019).



#### 4.2.7 Carbonato de Sódio Residual

Os resultados e as classificações do CSR estão na Tabela 13, possuem valor mínimo e valor máximo de -3,06 e 0,05, respectivamente, apresentaram média de -0,53 e desvio padrão de 0,87. Ao longo do período estudado, as águas do reservatório Banabuiú mantiveram a classificação considerada boa. Assim, as águas não possuem nenhuma limitação relacionada ao carbonato de sódio para o uso na irrigação. No ponto de vista da Hidroquímica, os valores negativos de CRS negativos sugerem que o carbonato de carbonato de sódio não precipita na solução e se encontra diluído durante o período de estudo. Dessa forma, as reduções nas concentrações de cálcio devem estar associadas à troca iônica ou à precipitação de outros sais.

Tabela 13 – Resultados e classificação do Carbonato de Sódio Residual.

Ano/Semestre	CSR	Classificação	Ano/Semestre	CSR	Classificação
2005.1	-0,13	Boa	2012.1	-0,02	Boa
2005.2	-0,05	Boa	2012.2	-0,06	Boa
2006.1	-0,11	Boa	2013.1	0,05	Boa
2006.2	-0,04	Boa	2013.2	0,01	Boa
2007.1	-0,35	Boa	2014.1	-0,15	Boa
2007.2	-0,06	Boa	2014.2	-0,12	Boa
2008.1	-0,06	Boa	2015.1	-0,21	Boa
2008.2	-0,11	Boa	2015.2	-0,73	Boa
2009.1	-0,04	Boa	2016.1	-1,27	Boa
2009.2	0,00	Boa	2016.2	-1,93	Boa
2010.1	-0,08	Boa	2017.1	-3,06	Boa
2010.2	-0,13	Boa	2017.2	-2,62	Boa
2011.1	-0,03	Boa	2018.1	-2,28	Boa
2011.2	-0,32	Boa	2018.2	-0,82	Boa

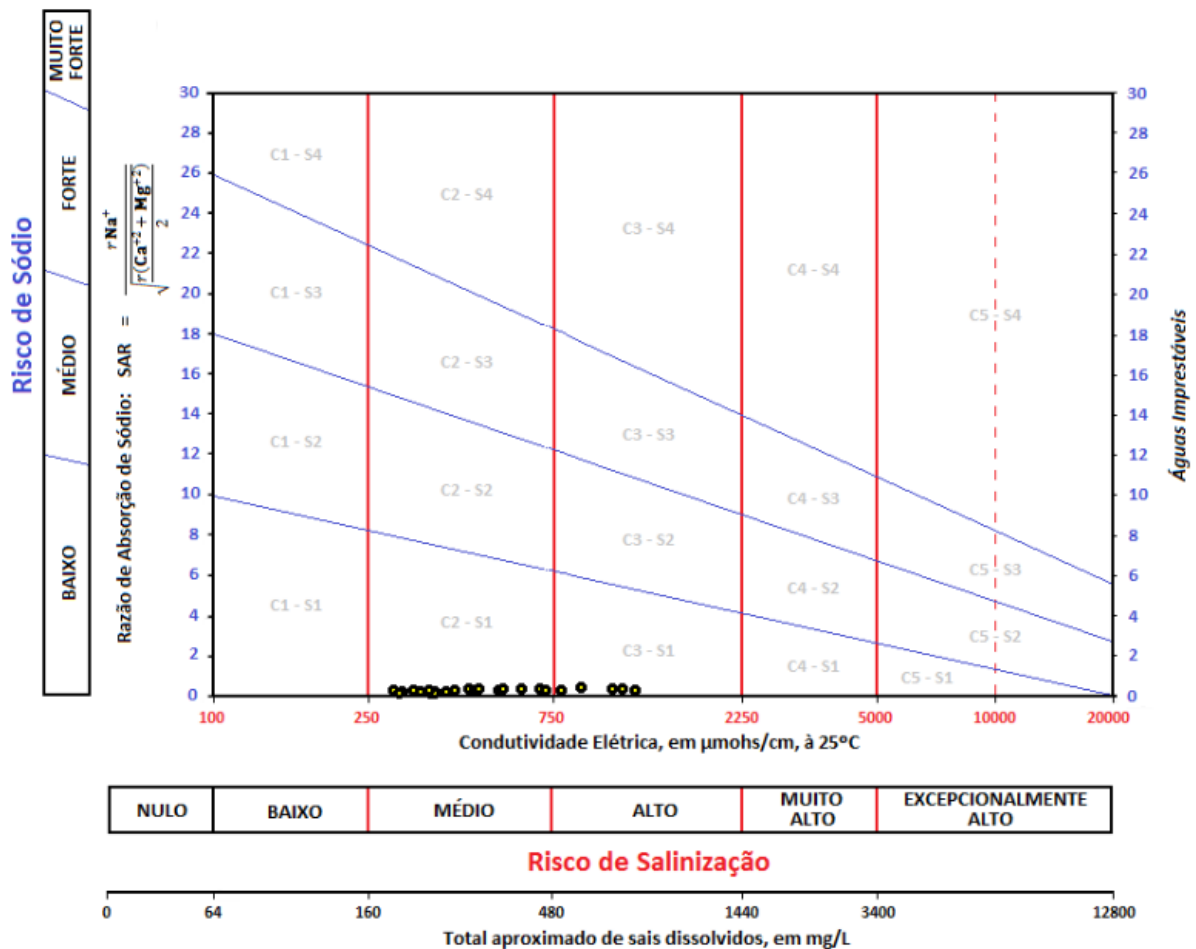
Fonte: elaborada pela autora.

#### 4.2.8 Razão de Adsorção do Sódio

Os resultados para CE ocorreram numa faixa entre 290,00 e 1203,00  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  com valor médio de 529,73 e desvio padrão de 544,75. Dessa forma, a CE mostrou-se como um parâmetro de suscetível a altas variações. Por outro lado, os valores obtidos para RAS variaram de 0,96 a 2,77, apresentaram uma média de 1,89 e desvio padrão 1,89. O diagrama USSL e os resultados estão na Figura 3 e Tabela 14, respectivamente.

Em torno de 18% das amostras pertencem à classe C3-S1 e 82% à classe C2-S1. Todos os semestres correspondem à classe S1, assim representam um baixo risco de sódio. Na avaliação do risco de salinização, a classe C2 abrange 23 semestres e representa um médio risco de salinização, enquanto que 5 semestres classificados como C3 estão associados ao alto risco de salinização, durante o período de 2016 ao primeiro semestre de 2018 (Tabela 14). Verifica-se que o risco de salinização é superior ao risco de sodificação conforme constatou Leprun (1983) ao estudar as águas do Nordeste.

Figura 3 – Classificação do diagrama USSL para as águas do Banabuiú.



Fonte: elaborada pela autora.

A classe C2 pode ser usada sempre e quando houver lixiviação moderada de sais (RICHARDS, 1974; MOREIRA *et al.*, 2016). As águas classificadas como C3 não devem ser utilizadas em solos com drenagens deficientes, mesmo em solos bem drenados pode ser necessário aplicação de práticas especiais de controle salino e cultivo de plantas tolerantes aos sais (RICHARDS, 1974; GHEYI; DIAS; LACERDA, 2010).

A classe S1 permite o uso da água em qualquer solo e possui a probabilidade mínima de desencadear a sodificação (RICHARDS, 1974; GHEYI; DIAS; LACERDA, 2010). No entanto, a classe S1 representa para a dinâmica da composição iônica da água uma maior quantidade de sódio disponível durante o período de 2005 a 2018. Outros reservatórios do semiárido também apresentaram um baixo risco de sodicidade, conforme observaram Oliveira *et al.* (2005), Vasconcelos *et al.* (2009) e Barroso *et al.* (2011).

Tabela 14 – Resultados e classificação da Razão de Adsorção de Sódio e Condutividade Elétrica.

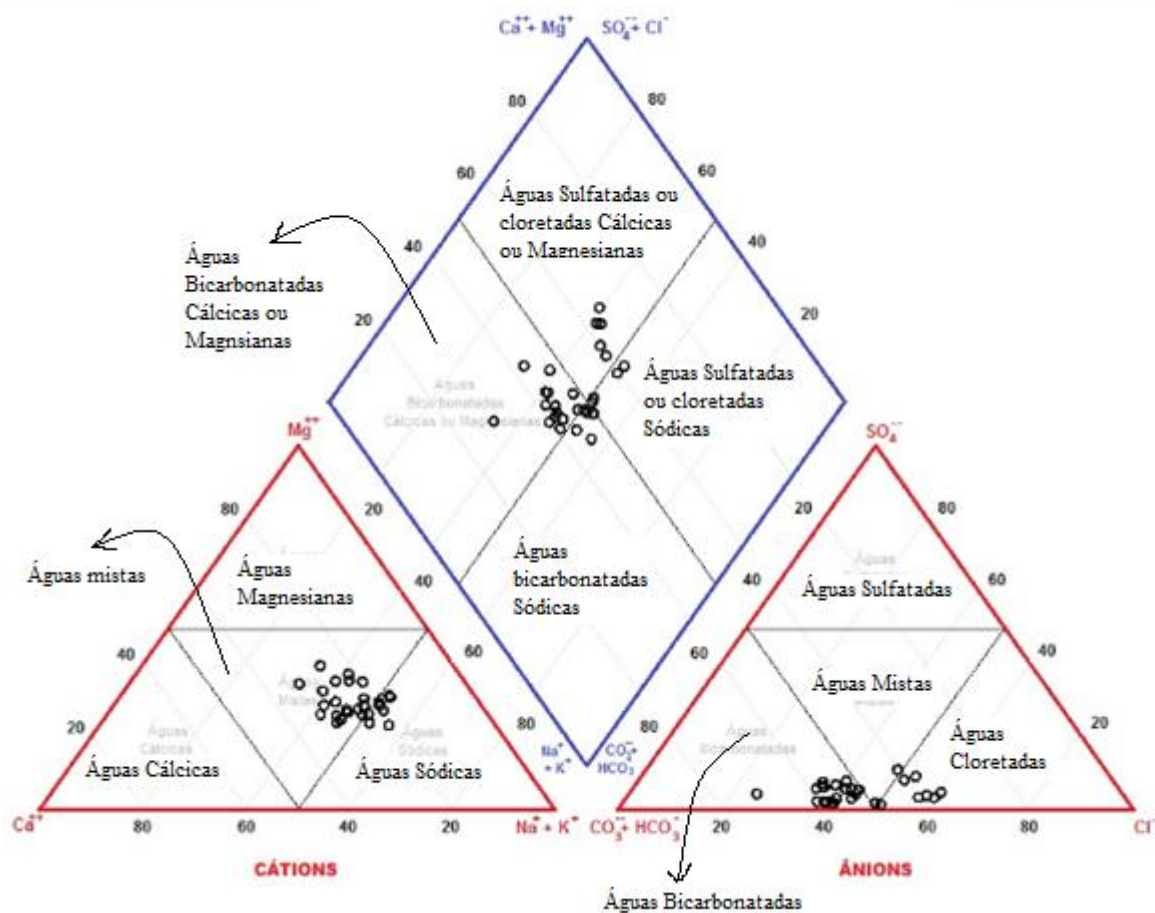
Ano/Semestre	CE	RAS	Classificação	Ano/Semestre	CE	RAS	Classificação
2005.1	330	1,45	C2 - S1	2012.1	395	1,51	C2 - S1
2005.2	339	1,64	C2 - S1	2012.2	415	1,79	C2 - S1
2006.1	362	0,96	C2 - S1	2013.1	450	2,48	C2 - S1
2006.2	290	1,87	C2 - S1	2013.2	480	2,14	C2 - S1
2007.1	370	1,65	C2 - S1	2014.1	538	2,11	C2 - S1
2007.2	468	2,06	C2 - S1	2014.2	551	2,41	C2 - S1
2008.1	473	1,98	C2 - S1	2015.1	617	2,30	C2 - S1
2008.2	370	1,21	C2 - S1	2015.2	685	2,53	C2 - S1
2009.1	328	1,57	C2 - S1	2016.1	873	2,77	C3 - S1
2009.2	304	1,50	C2 - S1	2016.2	1046	2,39	C3 - S1
2010.1	325	1,80	C2 - S1	2017.1	1203	2,10	C3 - S1
2010.2	358	1,69	C2 - S1	2017.2	1118	2,25	C3 - S1
2011.1	360	1,14	C2 - S1	2018.1	779	1,93	C3 - S1
2011.2	300	0,99	C2 - S1	2018.2	707	2,13	C2 - S1

Fonte: elaborada pela autora.

#### 4.2.9 Classificação das águas do reservatório

O resultado do diagrama é apresentado na Figura 4 e as classificações obtidas encontram-se apresentadas na Tabela 15. As classificações para os ânions foram bicarbonatadas (67,86%), cloretadas (21,43%) e mistas (10,71%). Por outro lado, as classificações relacionadas aos cátions foram mistas (67,86%) e sódicas (32,14%). De forma geral, as águas foram classificadas como bicarbonatada-mista (50,00%), mista-sódica (7,14%), bicarbonatada-sódica (17,86%), cloretada-sódica (7,14%), cloretada-mista (14,29%) e mista-mista (3,57%).

Figura 5 – Resultado do diagrama de Piper para as águas do Banabuiú.



Fonte: elaborada pela autora.

Costa e Gheyi (1984) encontraram águas predominantemente bicarbonatadas em condutividade menor que  $750 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  em salinidade mais altas cloretadas, neste estudo a maioria das águas bicarbonatadas estão abaixo deste valor. Costa *et al.* (2017) verificou a ocorrência alternada de águas bicarbonatadas nos períodos chuvosos e cloretadas em períodos secos, entre os anos de 2013 e 2014, no reservatório Poção do Ribeira em Sergipe. Portanto, corrobora com a predominância do tipo cloretada durante o período de estiagem no reservatório

Banabuiú em períodos de maior aporte e do tipo bicarbonatada de menor aporte. Destaca-se que devido às diferenças de porte, em relação ao Banabuiú, ao reservar maior volume demonstra maior suscetibilidade aos efeitos da estiagem prolongada.

Tabela 15 – Classificação das águas segundo diagrama de Piper.

<b>Ano/Semestre</b>	<b>Classificação</b>	<b>Ano/Semestre</b>	<b>Classificação</b>
2005.1	Bicarbonatada Mista	2012.1	Bicarbonatada Mista
2005.2	Bicarbonatada Mista	2012.2	Bicarbonatada Mista
2006.1	Bicarbonatada Mista	2013.1	Bicarbonatada Sódica
2006.2	Bicarbonatada Mista	2013.2	Bicarbonatada Sódica
2007.1	Bicarbonatada Mista	2014.1	Mista Sódica
2007.2	Bicarbonatada Sódica	2014.2	Bicarbonatada Sódica
2008.1	Bicarbonatada Sódica	2015.1	Mista Sódica
2008.2	Bicarbonatada Mista	2015.2	Cloretada Sódica
2009.1	Bicarbonatada Mista	2016.1	Cloretada Sódica
2009.2	Bicarbonatada Mista	2016.2	Cloretada Mista
2010.1	Bicarbonatada Mista	2017.1	Cloretada Mista
2010.2	Bicarbonatada Mista	2017.2	Cloretada Mista
2011.1	Bicarbonatada Mista	2018.1	Cloretada Mista
2011.2	Bicarbonatada Mista	2018.2	Mista Mista

Fonte: elaborada pela autora.

## 5 CONCLUSÕES

No período da estiagem prolongada (2010 a 2018), concluiu-se que as hierarquias iônicas predominantes foram para cátions e ânions,  $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$  e  $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{CO}_3^{2-} > \text{NO}_3^-$ , respectivamente. As correlações fortes apontadas e as variações do cálcio, magnésio e cloreto indicaram: acumulação desses íons no período de estiagem e como causa a principal redução do volume do reservatório, que está associado aos fatores climáticos. A razão  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  indicou que o escoamento subsuperficial, dissolução de halita, trocas iônicas reversas e trocas normais influenciaram os sais durante a estiagem. A razão  $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$  indicou que as águas possuíam predominantemente características de águas continentais e influência dos terrenos dolomíticos. Os Índices Cloro-alcálicos apontaram o predomínio de troca iônica e a ocorrência de troca iônica reversa no período do 2º semestre de 2016 ao 2º semestre de 2018, que foi confirmada pela razão  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$ . O Índice de Langelier indicou que as águas do Banabuiú tenderam a apresentar corrosividade e possuíam calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) dissolvida, o que esteve associado com concentrações maiores de cálcio. O diagrama de Gibbs determinou o intemperismo como principal responsável pela composição iônica. O Carbonato de Sódio Residual classificou as águas como boas para agricultura e para a hidroquímica mostrou que a redução de sódio não ocorre pela precipitação carbonato de sódio. A Razão Adsorção de Sódio indicou que as águas não oferecem risco de sodificação, no entanto predominou um risco de médio de salinização. Por fim, as águas que eram majoritariamente bicarbonatadas mistas tornaram-se cloretadas sódicas.

## REFERÊNCIA

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Reservatórios do Semiárido Brasileiro: Hidrologia, Balanço Hídrico e Operação**. Brasília: ANA, 2017.
- ARAÚJO NETO, J.; ANDRADE, E.; MEIRELES, A.; GUERREIRO, M.; PALÁCIO, H. Proposta de índice da salinidade das águas superficiais de reservatórios do Ceará, Brasil. **Revista Agro@ambiente**, Roraima, v. 8, n. 2, p. 184-193, mai./ago., 2014.
- ARAÚJO NETO, J.; SALES, M.; PALÁCIO, H.; GOMES, F.; CHAVES, L. Dinâmica da qualidade das águas superficiais para irrigação em reservatórios do estado do Ceará, Brasil. **Conex. Ci. e Tecnol**, Fortaleza, v. 9, n. 1, p. 51-60, mar., 2015.
- ARRAES, F.; ANDRADE, E.; PALÁCIO, H.; SOUSA, C.; SILVA, J.; FROTA JÚNIOR, J. Dinâmica da classificação das águas da bacia do Curu. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 17., 2007, São Paulo. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2007.
- AUDRRY, P; SUASSUNA, J. **A salinidade das águas disponíveis para a pequena irrigação no sertão nordestino**. Recife, PE: CNPq, p. 128, 1995.
- AYERS, R.; WESTCOT, D. **A qualidade da água na agricultura**. Campina Grande: UFPB, 1991. FAO. Estudos de Irrigação e Drenagem, 29, rev. 1. 218 p.
- BARROSO, A. A. F.; GOMES, G. E.; LIMA, A. E. O.; PALÁCIO, H. A. Q.; LIMA, C. A. Avaliação da qualidade da água para irrigação na região centro sul no estado do Ceará. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 6, p. 588–593, 2011.
- BECAURE, G; GASSAMA, N. TRESONNE, N., LOUVAT, D. Saline groundwaters in the hercynian granites (Chardon Mine, France): geochemical evidence for the salinity origin. **Applied Geochemistry**, v. 14(1), p. 67–84, 1999.
- BERMUDEZ-EDO, M.; BARNAGHI, P.; MOESSNER, K. Analysing real world datastreams with spatio-temporal correlations: Entropy vs. Pearson correlation. **Automation in Construction**, v. 88, p. 87-100, 2018.
- CAITANO, R.; LOPES, F.; TEIXEIRA, A. Estimativa da aridez no Estado do Ceará usando Sistemas de Informação Geográfica. In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2011, Curitiba. **Anais...** Curitiba: INPE, 2011.
- CALLEGARI-JACQUES, S. **Bioestatística: princípios e aplicações**. Porto Alegre: Artemed. p. 255, 2003.
- CAMPOS, J. **Vulnerabilidade do semi-árido às secas, sob o ponto de vista dos recursos hídricos**. Brasília, Projeto ÁRIDAS–RH, SEPLAN/PR, 1995.
- CAMPOS, J.; STUDART, T. Secas no Nordeste do Brasil: origens, causas e soluções. In: INTER-AMERICAN DIALOGUE ON WATER MANAGEMENT, 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2001.

CARTAYA, S.; ZURITA, S.; PÁRRAGA, V. Métodos de ajuste y homogenización de datos climáticos para determinar índice de humedad de Lang en la provincia de Manabí, Ecuador. **Revista La Técnica**, Portoviejo, n. 16, 94-106, jul./dez., 2016.

CEARÁ. Assembleia Legislativa. **Plano estratégico dos recursos hídricos do Ceará** / Conselho de Altos Estudos e Assuntos Estratégicos, Assembleia Legislativa do Estado do Ceará; Eudoro Walter de Santana (Coordenador). – Fortaleza: INESP, 2009. P. 408.

COGERH (COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS). **Inventário Ambiental Açude Banabuiú**. 2011.

CORTEZ, H.; LIMA, G.; SAKAMOTO, M. A seca 2010-2016 e as medidas do Estado do Ceará para mitigar seus efeitos. **Parc. Estrat.**, Brasília, v. 22, n. 44, p. 83-118, jan/jun, 2017.

COSTA, A.; MELO, J.; SILVA, F. Aspectos da salinização das águas do aquífero cristalino no Estado do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil. **Águas Subterrâneas**, São Paulo, v. 20, n.1, p.67-82, nov. 2006.

CUSTODIO, E.; LLAMAS, M. R. **Hidrología subterránea**. 2.ed. Barcelona: Omega, v. 2, 1983.

DA SILVA, P. *et al.* Adequação da água do reservatório Gritão do Carira para uso na irrigação-Carira/Se. In: II CONGRESSO INTERNACIONAL, 2015, Mato Grosso. **Anais...** Mato Grosso: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2015.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE OBRAS CONTRA A SECA. **Arquivo Técnico**. Processos do açude Banabuiú. Disponível em: < <https://www.dnocs.gov.br/~dnocs/barragens/banabuiu/banabuiu.htm>>. Acesso em: 20 jun. 2019.

DEZUANE, J. **Handbook of Drinking Water Quality**, John Wiley & Sons, New York, NY, 1997.

EATON, F. Significance of carbonates in irrigation. **Soil Science**, v. 69, n. 2, p. 123–134, 1950.

FALCÃO, T.; LEAL, J. Estudo hidroquímico da bacia do riacho do Navio-Pe. In: I CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 1980, Recife. **Anais...** Recife: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, 1980.

FROTA JUNIOR, J. *et al.* Influencia antrópica na adição de sais no trecho perenizado da bacia hidrográfica do Curu, Ceara. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 38, n. 2, p. 142- 148, 2007.

FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS. **Qualigraf**. Fortaleza: FUNCEME, 2014. Disponível em:<<http://www.funceme.br/qualigraf/app/pagina/show/2>>. Acesso em: 11 jun. 2019.

GETA, J.; INGLÉS, J. **Aspectos metodológicos en el estudio de la intrusión salina**, 1988.



GHEYI, H.; DIAS, N.; LACERDA, C; GOMES FILHO, E. **Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados**, Fortaleza, 2016.

GIBBS, R. Mechanisms Controlling World Water Chemistry. **Science**, v. 170, p. 1088-1090, 1970.

GRANJEIRO, M. *et al.* Razões iônicas e índices de Langelier e Larson no estudo hidrogeoquímico das águas subterrâneas no município de Quixeré – Ceará. In: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2009, Campo Grande. **Anais...** Campo Grande: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2009.

HEM, J.; **Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water**. 3 ed. U.S. Geological Survey: Alexandria, 1985.

JÚNIOR, C.; COLLISCHONN, W.; NES, E. Modelagem Ecológica como Ferramenta Auxiliar para Restauração de Lagos Rasos Tropicais e Subtropicais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, São Paulo, v. 15, n. 2, p. 15-25, abr./jun. 2010.

KAWO, N.; KARUPPANNAN, S. Groundwater quality assessment using water quality index and GIS technique in Modjo River Basin, central Ethiopia. **Journal of African Earth Sciences**, v. 147, p. 300–311, 2018.

LANGELIER, W. F. The analytical control of anticorrosion water treatment. **Journal American water works Association**, Denver, v. 28, p. 1500-1521, 1936.

LARAQUE, A. **Estudo e previsão da qualidade da água de açudes do Nordeste semi-árido brasileiro**. Recife, SUDENE/DPG/PRN/ Grupo de Trabalho de Hidrometeorologia, 1989. 95p.

LEPRUN, J. **Primeira Avaliação das Águas Superficiais do Nordeste: Relatório de fim de convênio de manejo e conservação do solo do Nordeste brasileiro**, Recife, SUDENE-DRN, 1983, p. 91-141, Convênio SUDENE/ORSTOM.

LIMA, A; LIMA-FILHO, F.; DIAS, N.; REGO, R.; BLANCO, F. NETO, F. Mechanisms controlling surface water quality in the Cobras river sub-basin, northeastern Brazil. **Rev. Caatinga**, Mossoró, v. 30, n. 1, p. 181 –189, jan./mar., 2017.

MANASSÉS, F. **Caracterização Hidroquímica da água subterrânea da formação serra geral na região sudoeste do estado do Paraná**. 2009. 110 p. Dissertação (Mestrado em Geologia Ambiental) –Curso de Pós Graduação em Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2009.

MARENGO, J.; CUNHA, A.; ALVES, L. A seca de 2012-15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico. **Climanálise**, p. 49-54, 2016.

MEIRELES, A.; FRISCHKORN, H.; ANDRADE, E. Sazonalidade da qualidade das águas do açude Edson Queiroz, bacia do Acaraú, no Semi-Árido cearense. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.38, n.1, p.25-31, 2007.

- MEIRELES, A.; FRISCHKORNS, H.; ANDRADE, E. Sazonalidade da qualidade das águas do açude Edson Queiroz, bacia do Acaraú, no Semi-Árido cearense. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.38, n.1, p.25-31, 2007.
- MÉLO, R.; COELHO, R.; TEIXEIRA, M. Entupimento de gotejadores convencionais por precipitados químicos de carbonato de cálcio e magnésio, com quatro índices de saturação de Langelier. **Irriga**, v. 13, n. 4, p. 525-539, 2008.
- MERCHÁN, D.; AUQUÉ, L.; ACERO, P.; GIMENO, M.; CAUSAPÉ, J. Geochemical processes controlling water salinization in an irrigated basin in Spain: Identification of natural and anthropogenic influence. **Science of The Total Environment**, v. 502, p. 330-343, 2015.
- MOREIRA, V.; HERNANDEZ, F.; MARQUES, E.; LUNA, N. Salinidade da água do Rio Curu – Ceará no período de estiagem. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v.10, n. 2, p. 507-514, 2016.
- NISHANTHINY, S. C.; THUSHYANTHY, M.; BARATHITHASAN, T.; SARAVANAN, S. Irrigation water quality based on hydro chemical analysis, Jaffna, Sri Lanka. **American Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 7, n. 1, p. 100-102, 2010.
- NWANKWOALA, H.; UDOM, G. Hydrochemical Facies and Ionic Ratios of Groundwater in Port Harcourt, Southern Nigeria. **Research Journal of Chemical Sciences**, v. 1, n. 3, p. 87-101, jun. 2011.
- OLIVEIRA, S. **Variação de índices iônicas em reservatórios no sertão cearense**. 2019. 152 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.
- OZLER, H. Carbonate weathering and connate seawater influencing karst groundwaters in the Gevas–Gurpinar–Guzelsu basins, Turkey. **Environ Earth Sci**, v. 6, p. 323–340, 2010.
- PAYNE, A. **The ecology of tropical lakes and rivers**. John Wiley & Sons, Chichester, 1986. 301 p.
- PEREIRA, L. *et al.* A salinidade das águas superficiais e subterrâneas na bacia da Gameleira, município de Aiuaba, CE. **Águas Subterrâneas**, v.20, n.2, p. 9-18, 2006.
- PEREIRA, L. *et al.* Hidroquímica de águas superficiais e subterrâneas da bacia da Gameleira, município de Aiuaba/Ce. In: I CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 2004, Mato Grosso. **Anais...** Mato Grosso: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, 2004.
- PORTO, M. F. A.; BRANCO, S. M.; LUCA, S. J. Caracterização da Qualidade da Água. In: PORTO, R.; BRANCO, S.; CLEARY, R.; COIMBRA, R.; EIGER, S.; LUCA, S.; NOGUEIRA, V.; PORTO, M. **Hidrologia ambiental**, v. 3. São Paulo: Edusp: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1991.

RAJU, N.; SHUKLA, U.; RAM, P. Hydrogeochemistry for the assessment of groundwater quality in Varanasi: a fast-urbanizing center in Uttar Pradesh, India. **Environmental Monitoring and Assessment**, 173(1-4), 279–300 p. 2011.

REIS, E.; REIS, I. Análise descritiva de dados. **Síntese numérica Estatística**, 2002.

RICHARDS, L. **Diagnosis and improvement of saline and alkaline soils**. US Department of Agriculture hand book, p. 60, 1954.

SAMI, K. Recharge mechanisms and geochemical processes in a semi-arid sedimentary basin, Eastern Cape, South Africa. **Journal of Hydrology**, v. 139, p. 27-48, 1992.

SANTIAGO, M. **Mecanismos de salinização em regiões semiáridas: estudo dos açudes Pereira de Miranda e Caxitoré**. 1964. 121 f. Tese (Doutorado: Geologia Geral e de Aplicação) – Instituto de Ciências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1964.

SANTIAGO, M.; SILVA, C.; FRICKORN, H.; TEIXEIRA, Z.; FILHO, J. Razões iônica e índices de Langelier e Larson no estudo hidrogeoquímico das águas subterrâneas no município de Quixerê. In: XVIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2009, Mato Grosso. **Anais...** Mato Grosso: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2009.

SANTOS. **Noções de Hidroquímica**. In FEITOSA, F.A.C.; MANOEL FILHO, J. Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. Fortaleza: CPRM, 2000, p. 81-102.

SCHOELLER, H. Geochemistry of groundwater. Groundwater studies—An international guide for research and practice (Ch. 15, pp. 1–18). UNESCO, Paris, 1977.

SHOELLER, H. **Geochemistry of Groundwater**. In: Brown, R.H., Konoplyantsev, A.A., Ineson, J. and Kovalevsky, V.S., Eds., Groundwater Studies: An International Guide for Research and Practice, UNESCO, Paris, p. 1-18, 1977.

SILVA JÚNIOR, L.; GHEYI, H.; MEDEIROS, J. Composição química de águas do cristalino do Nordeste Brasileiro. **Rev. bras. eng. agríc. Ambient.**, vol.3, n.1, p.11-17, 1999.

SILVA, F.; ARAÚJO, A.; SOUZA, R. Águas subterrâneas no Ceará – poços instalados e salinidade. **Revista Técnica**, Fortaleza, v. 28, n. 2, 2007.

SINGH *et al.* Hydrochemistry of reservoirs of Damodar River basin, India: weathering processes and water quality assessment. **Environmental Geology**, v. 48, p. 1014-1028, 2005.

TELLAM, J.; LLOYD, J. WALTERS, M. The morphology of a saline groundwater body: Its investigation, description and possible explanation. **Journal of Hydrology**, v. 83,(1-2), p. 1-21, 1986.

TUNDISI, J; TUNDISI, T. **Limnologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 632 p.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). **Diagnosis and Improvement of Saline and Alkaline Soils**. Salinity Laboratory Staff., 160 p., 1954.

VASCONCELOS, R. *et al.* Qualidade da água utilizada para irrigação na extensão da microbacia do baixo Acaraú. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 3, n. 1, p. 30–38, 2009.

VIEIRA, V. P. P. B. Desafios da gestão integrada de recursos hídricos no semi-árido. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 2, p. 7-17, 2003.

ZAIDI, F.; NAZZAL, Y.; JAFRI, M.; NAEEM, M.; AHMED, I. Reverse ion exchange as a major process controlling the groundwater chemistry in an arid environment: a case study from northwestern Saudi Arabia. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 187, p. 607-625, 2015.

ZHANG, J.; HUANG, W.; LÉTOLLE, R.; JUSSERAND, C. Major element chemistry of the Huanghe (Yellow River), China - weathering processes and chemical fluxes. **Journal of Hydrology**, v. 168, p. 173–203, 1995.