



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA ANALÍTICA E FÍSICO-QUÍMICA
CURSO DE QUÍMICA BACHARELADO

LUIS FELIPE SANTOS ARAUJO

**ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO CEARÁ: ANÁLISE DE CORROSIVIDADE E
INCRUSTAÇÃO**

FORTALEZA

2019

LUIS FELIPE SANTOS ARAUJO

**ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO CEARÁ: ANÁLISE DE CORROSIVIDADE E
INCRUSTAÇÃO**

Monografia submetida à Coordenação do Curso de Química Bacharelado, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Química com habilitação em Química Industrial.

Orientador: Prof. L.D. Francisco Belmino Romero.

Coorientadora: Dra. Érika de Almeida Sampaio Braga

FORTALEZA

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)

A69Á Araujo, Luis Felipe Santos.
Águas subterrâneas no Ceará: Análise de corrosividade e incrustação / Luis Felipe Santos Araujo. – 2019.
36 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências,
Curso de Química, Fortaleza, 2019.

Orientação: Prof. Dr. Francisco Belmino Romero.

Coorientação: Profa. Dra. Érika de Almeida Sampaio Braga.

1. Águas subterrâneas. 2. Corrosão. 3. Incrustação. I. Título.

CDD 540

LUIS FELIPE SANTOS ARAUJO

**ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO CEARÁ: ANÁLISE DE CORROSIVIDADE E
INCRUSTAÇÃO**

Monografia apresentada ao Programa de Graduação em Química da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Química com habilitação em Química Industrial.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. L.D. Francisco Belmino Romero (Orientador Pedagógico)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dra. Érika de Almeida Sampaio Braga (Orientadora Profissional)
Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará – NUTEC

Ma. Ana Aline Coelho Alcanfor (Examinadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Maria Consuelita dos Santos e Luiz José de Araújo pelo amor, dedicação e por fornecerem um sólido alicerce no qual minha vida se constrói.

A minha família, pela união e suporte.

Ao meu orientador Prof. L.D. Francisco Belmino Romero, pela disposição e entusiasmo ao ensinar.

A Dra. Érika de Almeida Sampaio Braga, por compartilhar sua experiência e conhecimento.

Aos participantes da banca examinadora Prof. L.D. Francisco Belmino Romero, Dra. Érika de Almeida Sampaio Braga e Ma. Ana Aline Coelho Alcanfor pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

A minha amiga Samile Bezerra de Aguiar, minha dupla durante todos os dias da graduação.

Aos colegas de turma de graduação e amigos do Laboratório de Polímeros.

A Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará (NUTEC), em especial Cristiane, Eirilândia e aos colegas de estágio Rodrigo e Maria.

A Universidade Federal do Ceará.

RESUMO

O estado do Ceará, principalmente a região do sertão, sempre foi suscetível a crises hídricas devido a irregularidade das quadras chuvosas, resultando em baixos níveis de água nos reservatórios. A construção de poços é uma alternativa para combater a escassez de água para abastecimento, pois as águas subterrâneas são menos vulneráveis a evaporação. No entanto as águas obtidas através de poços nem sempre são de boa qualidade, o solo cristalino é predominante no estado e as águas obtidas a partir de poços perfurados nessas regiões são comumente salobras. A alta salinidade e outros fatores da composição das águas subterrâneas podem causar problemas de corrosão e incrustação no sistema de captação dos poços. Assim, o objetivo deste trabalho é a análise dos parâmetros físico-químicos para identificar a agressividade das águas e planejar uma manutenção eficiente. Para o estudo foram coletadas quinze amostras de águas em diferentes poços em três regiões do estado, as análises dos parâmetros físico-químicos seguiram os procedimentos descritos em (APHA, 2012) e foram realizadas no Laboratório de Química Ambiental da Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará (NUTEC). Foram utilizados os índices de saturação de Langelier e estabilidade de Ryznar para relacionar os resultados obtidos e o comportamento corrosivo ou incrustante das águas. Os resultados obtidos mostraram que as águas subterrâneas das regiões Norte e Sul do estado apresentam caráter corrosivo e na região do Sertão caráter incrustante.

Palavras-chave: Águas subterrâneas. Corrosão. Incrustação.

ABSTRACT

The state of Ceará, especially in the backlands, has always been susceptible to water crisis due to the irregularity of the wet season, resulting in low water levels in the reservoirs. Well construction is an alternative to combat water scarcity as groundwater is less vulnerable to evaporation. However, water obtained through wells are not always of good quality, crystalline basement is predominant in the state and wells drilled in these regions commonly have brackish water. High salinity and other factors in groundwater composition can cause corrosion and fouling problems in the well capture system. Thus, the objective of this work is the analysis of the physicochemical parameters to identify the aggressiveness of the waters and to plan an efficient maintenance. For the study, fifteen water samples were collected in different wells in three regions of the state, chemical analysis followed procedures from (APHA, 2012) and were performed at the Laboratório de Química Ambiental in Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial do Ceará (NUTEC). The Langelier saturation and Ryznar stability indices were used to connect the results obtained and the corrosive or fouling behavior of the waters. The obtained results show that the groundwater of the North and South regions of the state has corrosive character and in the Sertão region fouling behavior.

Keywords: Groundwater. Corrosion. Fouling.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS	12
2.1	Objetivo geral	12
2.2	Objetivos específicos	12
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1	Águas subterrâneas	13
3.1.1	<i>Águas subterrâneas e o ciclo hidrológico</i>	13
3.1.2	<i>Águas subterrâneas e a composição química</i>	14
3.1.2.1	<i>Sólidos dissolvidos totais (SDT)</i>	15
3.1.2.2	<i>Condutividade</i>	15
3.1.2.3	<i>Espécies inorgânicas dissolvidas</i>	15
3.1.3	<i>Evolução química de águas subterrâneas naturais</i>	16
3.1.3.1	<i>Química das águas da chuva</i>	16
3.1.3.2	<i>Solo - Dióxido de carbono</i>	17
3.1.3.3	<i>A interação da água com rochas carbonáticas</i>	17
3.1.3.4	<i>Águas subterrâneas em terreno cristalino</i>	17
3.1.3.5	<i>Águas subterrâneas em terreno sedimentar</i>	18
3.2	Estruturas geológicas do Ceará	18
3.3	Poços tubulares	20
3.4	Corrosão	21
3.4.1	<i>Corrosão por águas naturais</i>	22
3.4.2	<i>Incrustação</i>	23
3.4.3	<i>Índice de Saturação de Langelier (LSI)</i>	23
3.4.4	<i>Índice de Estabilidade de Ryznar (RSI)</i>	24
4	MATERIAIS E MÉTODOS	26
4.1	Determinação de pH à 25 °C (4500-H⁺ – APHA, 2012)	26
4.2	Determinação de sólidos dissolvidos totais (2540 C – APHA, 2012)	26
4.3	Determinação de dureza total e cálcio (2340 C; 3500-Ca B – APHA, 2012)	27
4.3.1	<i>Preparo de solução tampão pH 10</i>	27
4.3.2	<i>Preparo de solução de EDTA 0,01 mol.L⁻¹</i>	27
4.3.3	<i>Padronização da solução de EDTA 0,01 mol.L⁻¹</i>	27

4.3.4	<i>Procedimento para determinação de dureza total (DT)</i>	28
4.3.5	<i>Procedimento para determinação de dureza de cálcio</i>	28
4.4	Determinação de alcalinidade parcial (AP) e total (AT)	29
4.4.1	<i>Solução padrão de carbonato de sódio 0,01 mol.L⁻¹</i>	29
4.4.2	<i>Solução alcoólica de fenolftaleína 0,5%</i>	29
4.4.3	<i>Solução de alaranjado de metila 0,1 %</i>	29
4.4.4	<i>Solução de ácido sulfúrico 0,01 mol.L⁻¹</i>	29
4.4.5	<i>Padronização da solução de ácido sulfúrico 0,01 mol.L⁻¹</i>	30
4.4.6	<i>Procedimento para análise de alcalinidade</i>	30
4.5	Determinação da condutividade (2510 B – APHA, 2012)	31
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
6	CONCLUSÃO	35
	REFERÊNCIAS	36

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural indispensável para manutenção dos ecossistemas e praticamente está envolvida em todas as atividades antrópicas como agropecuária, produção energética, atividades industriais e abastecimento doméstico.

O Nordeste brasileiro, em particular o estado do Ceará, possui uma intensa variabilidade climática, estando suscetível a grandes períodos de seca, inviabilizando a recarga dos mananciais e o abastecimento público. Assim, as águas subterrâneas se tornam uma alternativa importante como fonte de água, pois estão mais protegidas contra a evaporação. A construção de poços tubulares é um recurso eficiente para o enfrentamento as secas, mas nem sempre assegura a obtenção de água de qualidade. O Ceará possui 70% do seu território presente em solo cristalino, as águas obtidas nesse meio são normalmente salobras. A Resolução nº 396, de 03 de abril de 2008, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) considera como valor máximo permitido para consumo humano 1000 mg.L^{-1} de sólidos dissolvidos totais e a Portaria de Consolidação PRC nº 05 de 28 de setembro de 2017, do Ministério da Saúde apresenta 500 mg.L^{-1} como valor máximo de dureza total.

A alta salinidade e outros fatores de composição, como pH e dureza, das águas podem gerar problemas de corrosividade e incrustação nos sistemas de captação das águas subterrâneas. A corrosão é o desgaste de um material sofrido por reações químicas ou eletroquímicas. As tubulações metálicas de ferro, cobre e aço galvanizado em contato com águas agressivas de baixo pH e dureza, produz corrosão. Com o tempo a corrosão pode obstruir os tubos ou deteriorar até ocorrer o rompimento. Em tubulações em contato com águas de alto pH e dureza pode ocorrer a precipitação de substâncias, formando incrustações que podem ocasionar obstruções.

Assim a análise dos parâmetros físico-químicos é necessária para identificar se as águas subterrâneas obtidas podem causar problemas de corrosão e incrustação, e após a identificação do caráter das águas é necessário o planejamento de proteção e manutenção dos sistemas de obtenção da água, como encanamentos e motobomba.

Portanto, a partir do contexto acima, este trabalho teve como objetivo a análise de águas subterrâneas de diferentes regiões do estado do Ceará, nos parâmetros físico-químicos: pH à 25°C , condutividade à 25°C , sólidos dissolvidos totais (SDT), dureza total (DT), cálcio e alcalinidade total. Com os valores de SDT e DT obtidos, a verificação de potabilidade foi realizada utilizando os parâmetros da Resolução nº 396 do CONAMA e PRC nº 05/2017 do Ministério da Saúde. A partir destes resultados foram realizados os cálculos do Índice de

Saturação de Langelier (LSI) e do Índice de Estabilidade de Ryznar (RSI), para determinar o caráter corrosivo ou incrustante das águas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar o potencial de corrosão e incrustação de águas de poços coletadas em diferentes regiões do estado do Ceará.

2.2 Objetivos específicos

- Determinar os parâmetros pH à 25°C, condutividade à 25°C, sólidos dissolvidos totais, dureza total, cálcio e alcalinidade total das amostras.
- Calcular os índices relacionados a incrustação e corrosão: Índice de Saturação de Langelier (LSI) e Índice de Estabilidade de Ryznar (RSI).

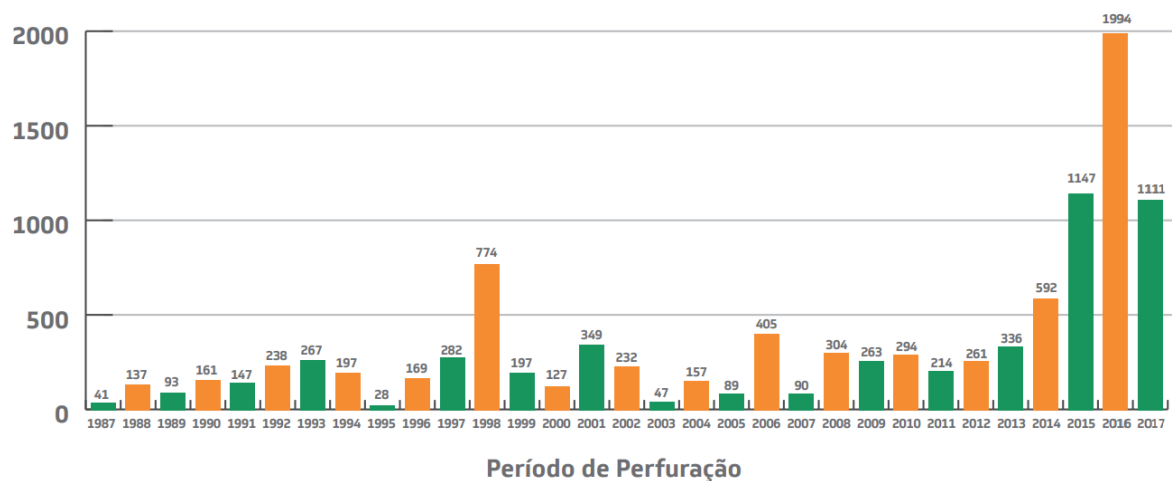
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Águas subterrâneas

Águas subterrâneas são aquelas encontradas no subsolo, em fendas e espaços no solo e formações geológicas (FREEZE, 1979). Esses espaços vazios abaixo da superfície do solo são preenchidos pelo excedente das águas da chuva, funcionando como reservatórios hídricos.

No estado do Ceará a instalação de poços para obtenção de águas subterrâneas vem aumentando significativamente nos últimos anos (Figura 1) como alternativa para o enfrentamento dos períodos de seca. A vantagem oferecida pelas águas subterrâneas no período de secas está no fato de que se encontram mais protegidas da evaporação.

Figura 1 – Número de poços construídos entre 1987 e 2017 no estado do Ceará



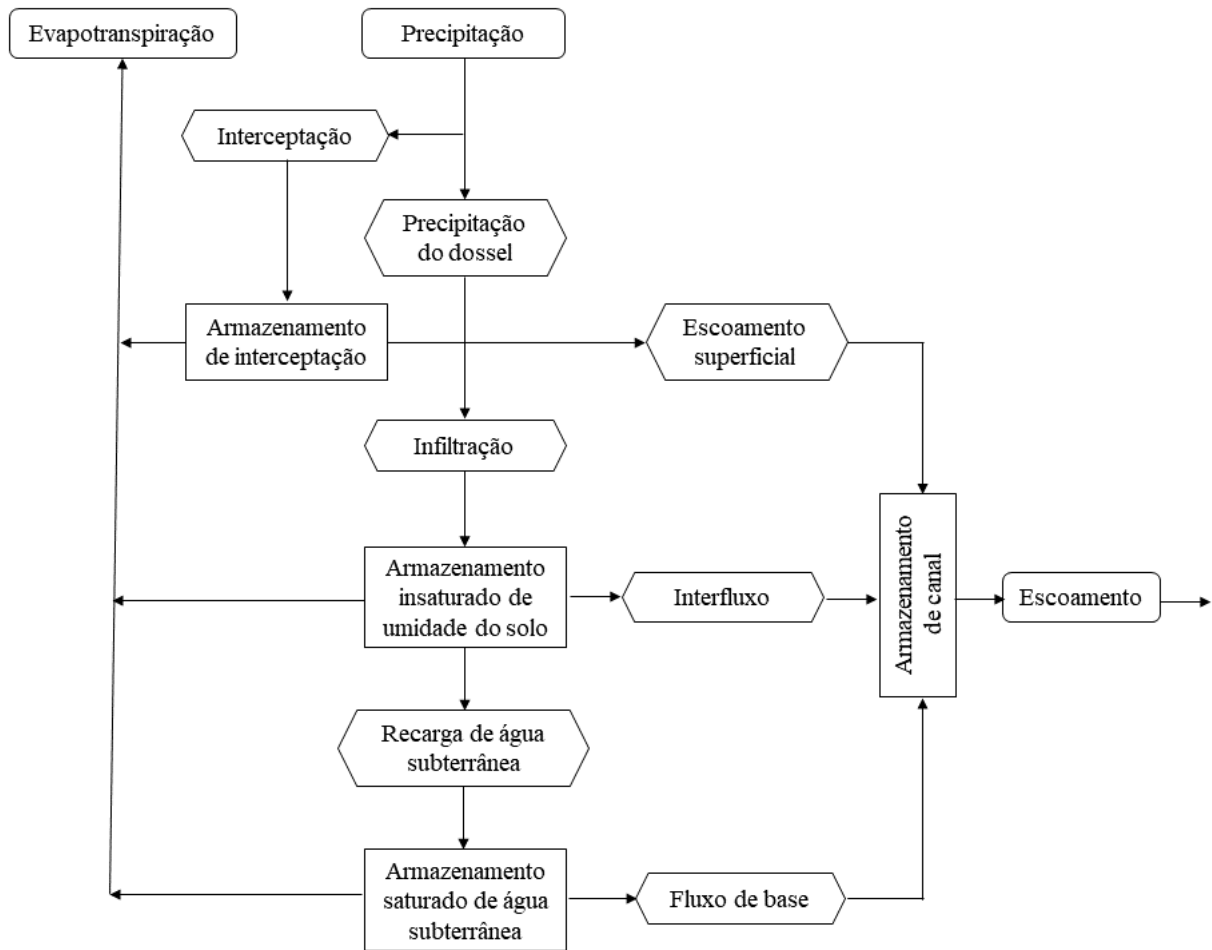
Fonte: Plano de ações estratégicas de recursos hídricos do Ceará (2018, p. 75).

Embora seja um meio eficiente de obtenção de água, a perfuração de poços não garante água de qualidade. No Ceará grande parte do território se encontra em solo cristalino, e águas subterrâneas obtidas nesse meio geralmente possuem alta salinidade.

3.1.1 Águas subterrâneas e o ciclo hidrológico

O ciclo hidrológico (Figura 2) é a contínua circulação de água na hidrosfera, entre oceano, atmosfera e solo.

Figura 2 – Representação sistemática do ciclo hidrológico



Fonte: Adaptado de FREEZE, R. A. Groundwater (p. 4).

A entrada de água no ciclo hidrológico se dá por meio de precipitação na forma de chuva. A saída se dá por meio de fluxo de corrente (fluxo de água em córregos, canais e rios), e por evapotranspiração, que é a combinação de evaporação de corpos de água abertos e a perda de água de plantas por transpiração. A reposição de águas subterrâneas ocorre por infiltração, nesse processo íons e partículas presentes no solo são carregadas pela água.

3.1.2 Águas subterrâneas e a composição química

Os constituintes químicos e bioquímicos das águas subterrâneas determinam a possibilidade do seu uso para consumo humano, para irrigação, uso industrial, etc. Os compostos dissolvidos indicam por qual tipo de solo e rochas a água teve contato durante a infiltração.

3.1.2.1 Sólidos dissolvidos totais (SDT)

A água é um composto polar, um solvente para muitos compostos iônicos e alguns orgânicos. As moléculas de água tendem a envolver íons promovendo a estabilização. Como resultado da sua interação com materiais geológicos, e em menor escala com a atmosfera, águas subterrâneas possuem uma variedade de compostos inorgânicos dissolvidos. Os sólidos dissolvidos totais (SDT) é o conjunto desses compostos inorgânicos e orgânicos contidos na água em forma de íons ou moléculas (FREEZE, 1979).

A Resolução nº 396 de 2008 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) considera como valor máximo permitido para consumo humano 1000 mg.L⁻¹ de sólidos dissolvidos totais.

3.1.2.2 Condutividade

Condutividade é uma medida da habilidade de uma solução aquosa de conduzir corrente elétrica (APHA, 2012). Água subterrânea é considerada um composto eletrolítico, pois quase todos os compostos dissolvidos estão na forma iônica. O total de compostos iônicos dissolvidos pode ser estimado pela determinação da capacidade da água de conduzir uma corrente aplicada, este valor é expresso em $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.

3.1.2.3 Espécies inorgânicas dissolvidas

A classificação dos compostos inorgânicos em águas subterrâneas apresentados na Tabela 1 é um valor médio de concentração, variações podem ocorrer em diferentes águas. Os íons (HCO_3^- , Ca^{2+} , Cl^- , Mg^{2+} , Na^+ e SO_4^{2-}) geralmente representam 90% da concentração de sólidos dissolvidos totais.

As concentrações dos íons majoritários e minoritários são controlados pela composição do solo e rochas pelos quais a água passou. Características geoquímicas como solubilidade, adsorção, cinética e sequência do contato da água com diferentes minerais, limitam a dissolução.

A dureza da água está relacionada à concentração de sais de metais alcalino terrosos, principalmente Ca^{2+} e Mg^{2+} . A PRC nº 05 de 2017 do Ministério da Saúde apresenta como valor máximo de dureza total 500 mgCaCO₃.L⁻¹, para consumo humano.

Tabela 1 – Classificação de compostos inorgânicos dissolvidos em águas subterrâneas

Majoritários (> 5 mg.L ⁻¹)	Minoritários (0,01 – 10,0 mg.L ⁻¹)
Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	Boro
Cálcio (Ca ²⁺)	Carbonato (CO ₃ ²⁻)
Cloreto (Cl ⁻)	Fluoreto (F ⁻)
Magnésio (Mg ²⁺)	Ferro (Fe ³⁺ , Fe ²⁺)
Sílica (SiO ₂)	Nitrato (NO ₃ ⁻)
Sódio (Na ⁺)	Potássio (K ⁺)
Sulfato (SO ₄ ²⁻)	Estrôncio (Sr ²⁺)
Ácido carbônico (H ₂ CO ₃)	

Fonte: Adaptada de Hydrogeology (DAVIS, 1966).

3.1.3 Evolução química de águas subterrâneas naturais

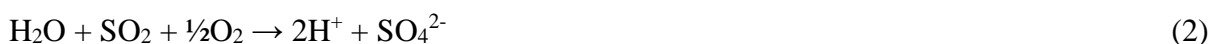
Quase toda água subterrânea tem origem nas chuvas que se infiltram pelas formações geológicas. O solo tem propriedades únicas que lhe dão capacidade de alterar a composição química das águas.

3.1.3.1 Química das águas da chuva

A composição química das águas da chuva diferem, em regiões litorâneas e próximas a indústrias as concentrações de sólidos dissolvidos são bem maiores que em regiões continentais e não industriais. O pH da água da chuva de regiões não urbanas e não industriais está entre 5 e 6, isto ocorre pelo equilíbrio da água com o dióxido de carbono atmosférico (Reação 1).



Em regiões industriais o pH pode ser tão baixo quanto 3-4, isto ocorre devido a presença de dióxido de enxofre (SO₂), emitido na atmosfera pelas fábricas. A Reação 2 mostra a formação do ácido sulfúrico.



3.1.3.2 Solo - Dióxido de carbono

A água que infiltra para as águas subterrâneas quase sempre passa pela zona do solo. Solo por definição é a camada da superfície terrestre que sofreu intemperismo químico, físico e biológico, sendo capaz de promover o crescimento de plantas. O solo tem a capacidade de gerar grandes quantidades de ácido, devido a formação de CO₂ na decomposição de matéria orgânica (Reação 3) e na respiração das raízes de plantas.



A pressão parcial de CO₂ no solo (10⁻³ – 10⁻¹ bar) é bem maior que na atmosfera terrestre. A água da chuva em contato com o solo tem seu pH diminuído, por exemplo, com a pressão parcial de 10⁻¹ o pH de equilíbrio entre 0 – 25°C seria de 4,3-4,5. Essas águas entram em contato com vários minerais que são dissolvidos na presença de ácido carbônico (H₂CO₃).

3.1.3.3 A interação da água com rochas carbonáticas

Os minerais carbonato, onde os mais importantes são calcita CaCO₃ e dolomita CaMg(CO₃)₂, estão presentes em quase todos os terrenos sedimentares e em muitas áreas de terreno cristalino. Estes minerais são dissolvidos em águas na presença de ácido carbônico, o processo se dá pela Reação 4.



A dissolução é chamada de sistema aberto quando ocorre acima do lençol freático, onde CO₂ presente em espaços vazios é abundante. Em sistemas fechados o CO₂ é consumido e não restituído.

3.1.3.4 Águas subterrâneas em terreno cristalino

Rochas cristalinas de origem ígnea ou metamórfica possuem quantidades apreciáveis de quartzo (SiO₂) e aluminossilicatos como feldspatos e micas. Esses minerais são formados em pressões e temperaturas muito maiores que as encontradas próximas a superfícies onde as águas subterrâneas se encontram. Assim, esses minerais são

termodinamicamente instáveis e tendem a se dissolver em água, podendo levar a grandes concentrações de sólidos dissolvidos totais.

Como nas rochas carbonáticas, a dissolução de micas, feldspatos e outros silicatos são influenciados pela presença de CO₂ na água na forma de ácido carbônico. Os cátions dissolvidos em água são normalmente Na⁺, K⁺, Mg²⁺ e Ca²⁺. Uma das consequências é o aumento de pH e concentração de HCO₃⁻.

3.1.3.5 Águas subterrâneas em terreno sedimentar

Muitas rochas sedimentares consistem de uma mistura de minerais com origens sedimentares, ígneas e metamórficas. Assim este tipo de terreno é bastante complexo, tendo grande variação de camadas e composição em diferentes regiões.

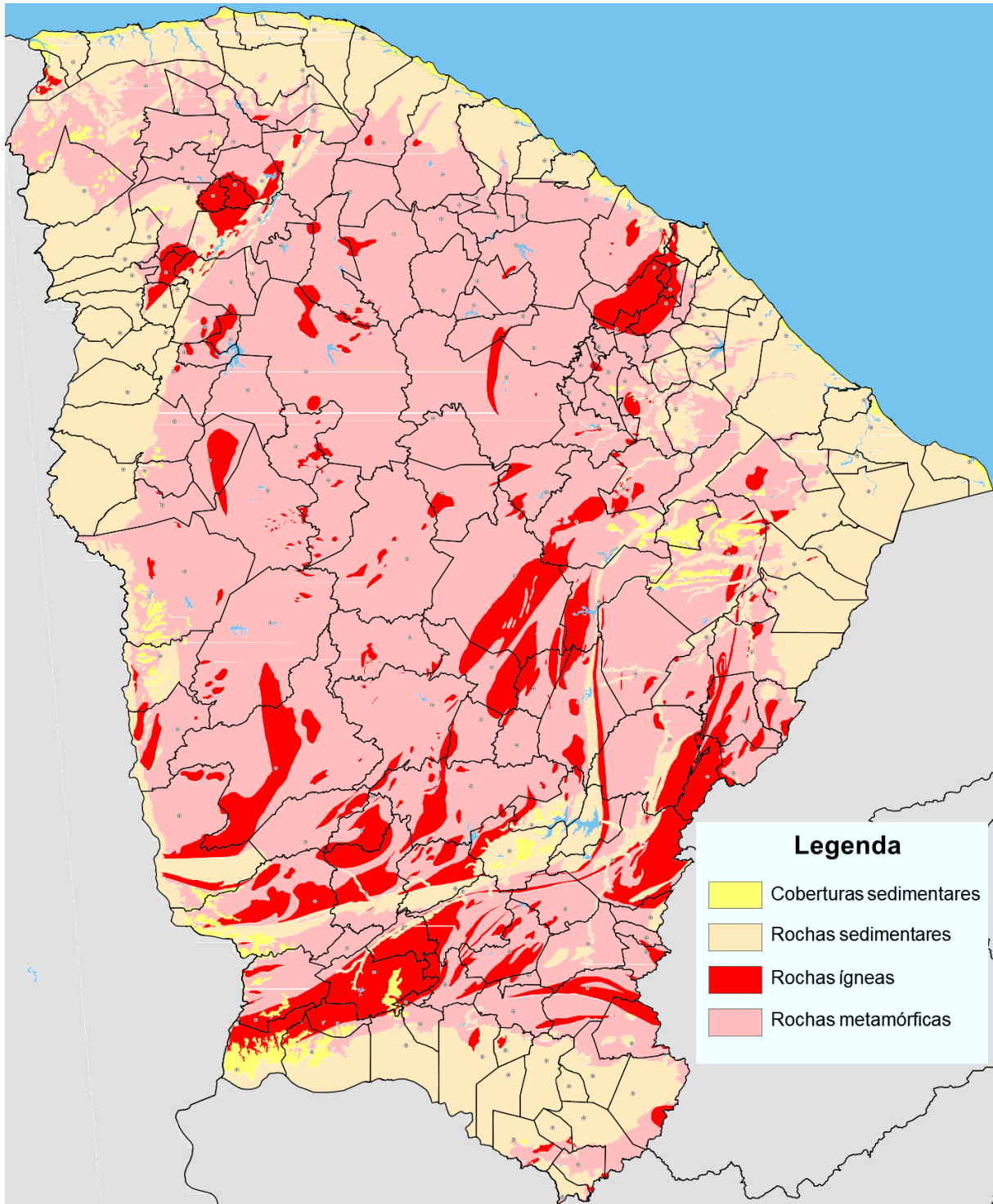
3.2 Estruturas geológicas do Ceará

Cerca de 70% do território do Ceará é de estrutura cristalina, formada por rochas ígneas e metamórficas. O complexo cristalino é a mais antiga formação geológica do Ceará, a base onde todos os depósitos posteriores vieram repousar. É composto de rochas metamórficas como gnaisses, micaxistos e quartzitos. Gnaisse é a rocha mais importante e abundante do sistema, é composta por diversos minerais, como: plagioclásio, feldspato potássio, quartzo e biotita. Também são encontrados calcários sacaroides e rochas ígneas intrusivas como granito. (SOBRINHO, 1941)

As bacias sedimentares são produtos da erosão das rochas cristalinas em milhões de anos. As regiões onde o terreno sedimentar é encontrado no Ceará incluem: tabuleiros costeiros, Chapada do Apodi, Chapada da Ibiapaba, Bacia do Iguatu e a Chapada do Araripe. O tabuleiro costeiro compreende a faixa litorânea composta por argissolos e neossolos quartzarênicos. A Chapada do Apodi é uma formação montanhosa encontrada na divisa do Ceará e do Rio Grande do Norte. A Bacia do Iguatu é uma depressão sedimentar em meio a superfície sertaneja. A Chapada do Araripe se encontra na divisa dos estados do Ceará, Pernambuco e Piauí.

A Figura 3 apresenta o mapa geológico simplificado do Ceará, com o embasamento cristalino representado pelas rochas metamórficas e ígneas e o terreno sedimentar dividido entre coberturas sedimentares recentes e rochas sedimentares.

Figura 3 – Mapa geológico simplificado do Ceará



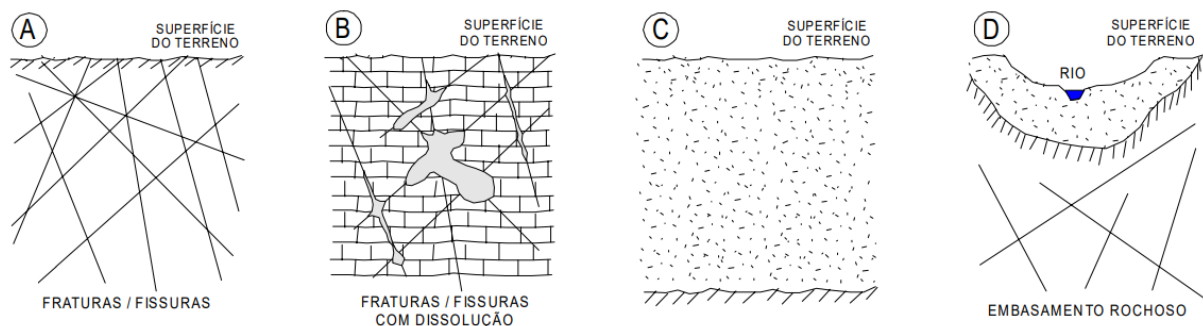
Fonte: Adaptada IPECE, 2015.

3.3 Poços tubulares

Os poços tubulares são aqueles onde a perfuração é realizada por meio de máquinas perfuratrizes à percussão, rotativas e rotopneumáticas. Possui no máximo 50 cm de abertura e é revestido com canos de ferro ou de plástico. (CPRM, 1998)

A Figura 4 indica os tipos de formações aquíferas onde água pode ser obtida. As formações podem ser de rochas consolidadas: aquífero fissural (A) e cárstico-fissural (B); e rochas sedimentares não consolidadas: aquífero intersticial (C) e aluvial (D).

Figura 4 – Formações aquíferas

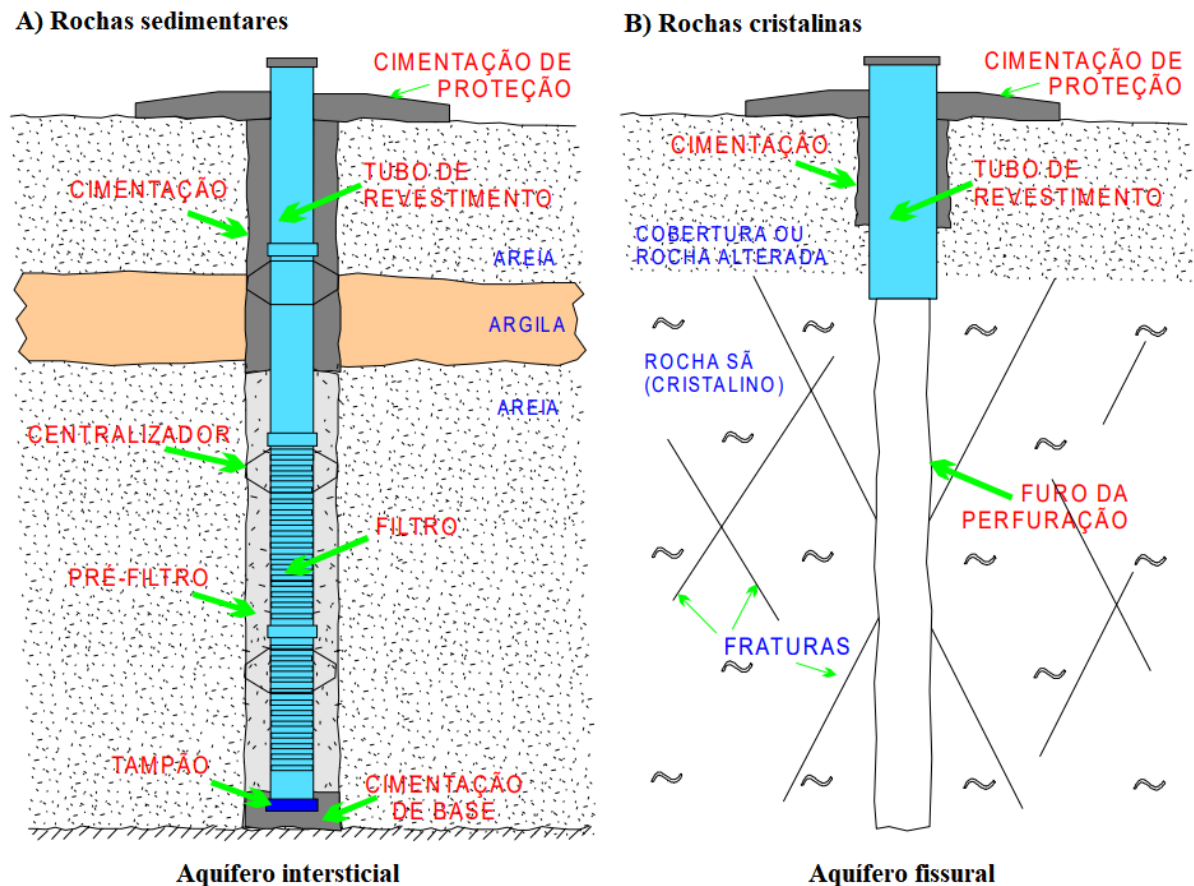


Fonte: Noções básicas sobre poços tubulares (CPRM, 1998).

Os poços perfurados em rochas cristalinas geralmente possuem cerca de 60 metros de profundidade, com diâmetro entre 4 e 6 polegadas. Em geral possuem baixas vazões. Em rochas sedimentares são encontrados poços com diversas profundidades, podendo atingir mais de 1000 metros, o diâmetro varia entre 4 e 22 polegadas e a vazão depende da localização, variando de pequena a alta.

Após a perfuração é colocada a tubulação do poço, que consiste no revestimento e filtro. Em poços perfurados em rochas cristalinas o revestimento ocorre apenas na parte superior onde a rocha foi alterada. Em rochas sedimentares pode ser necessário a adição de um pré-filtro de cascalho e um filtro baixado juntamente a tubulação de revestimento. A cimentação ocorre no espaço entre os tubos e a parede de formação, unindo-as e impedindo a entrada de águas que possam contaminar o aquífero, também é formado um tampão no fundo do poço. Na tubulação de revestimento são geralmente utilizados tubos metálicos (de aço) ou de PVC (Policloreto de polivinila). Para a retirada de água são necessárias bombas e tubulações de descarga. A Figura 5 exhibe os componentes de poços perfurados em rochas sedimentares e cristalinas.

Figura 5 – Estruturas dos poços em terrenos sedimentares e cristalinos



Fonte: Noções básicas sobre poços tubulares (CPRM, 1998).

3.4 Corrosão

A corrosão é definida como a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente aliada ou não a esforços mecânicos. (GENTIL, 1996). Essa deterioração representa alterações indesejáveis como desgaste, variações químicas ou estruturais, tornando o material inadequado para o uso.

A deterioração de materiais não-metálicos também pode ser considerada corrosão, como por exemplo a deterioração de concreto, polímeros, borracha e madeira. A corrosão é um processo espontâneo e está constantemente alterando materiais e diminuindo a sua durabilidade e desempenho, como por exemplo as tubulações e bombas utilizadas em poços tubulares. As perdas ocasionadas pela corrosão envolvem o custo da substituição de peças e equipamentos, custos de manutenção e de proteção contra a corrosão.

As reações químicas e eletroquímicas dos processos de corrosão ocorrem na interface da interfase entre o metal e o meio corrosivo. Nas reações de oxidação-redução, o

metal é o agente redutor, cedendo elétrons que são recebidos pela substância oxidante presente no meio.

3.4.1 Corrosão por águas naturais

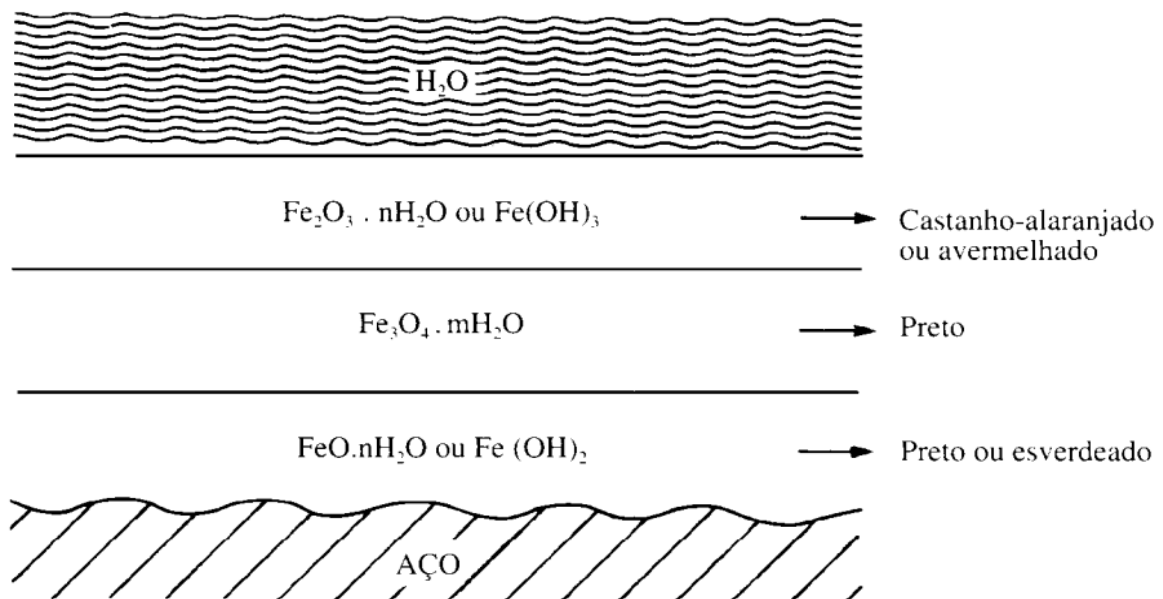
Materiais metálicos tendem a sofrer corrosão em contato com a água, o grau de corrosão depende das substâncias presentes. Gases e sais dissolvidos, matéria orgânica, bactérias e sólidos suspensos são um dos fatores que influenciam diretamente na corrosão. O pH, temperatura, velocidade e ação mecânica também devem ser considerados na avaliação do caráter corrosivo das águas.

Minerais dissolvidos em água se separam em íons que conduzem eletricidade. A alta quantidade de sólidos dissolvidos totais em contato com tubulações formados por diferentes metais resulta na formação de uma célula galvânica. A célula gera eletricidade, ocorrendo a oxidação de um dos metais. A corrosão de tubulações de aço devido a presença de oxigênio ocorre segundo a Reação 5.



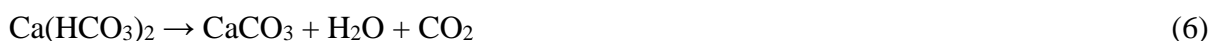
O produto de corrosão pode se depositar na tubulação formando tubérculos ou pode ser arrastado pela água contaminando-a.

Figura 6 – Constituintes dos tubérculos formados pelos produtos de corrosão do aço em água.



3.4.1 Incrustação

Os sais, principalmente de alcalino terrosos como de cálcio e magnésio, quando dissolvidos em água caracterizam a sua dureza. A dureza é chamada permanente quando se apresentam como sulfatos e cloretos, e temporária ou carbonática quando se apresenta na forma de bicarbonatos. Águas com dureza temporária podem se depositar em uma camada formada principalmente de carbonato de cálcio. O CaCO_3 precipitado pode se aderir as paredes de tubulações, com o tempo essa camada pode crescer formando incrustações diminuindo a seção do tubo e assim diminuindo a vazão, podendo até mesmo ocasionar a completa obstrução. A decomposição dos bicarbonatos de cálcio e magnésio se dão pelas Reações 6 e 7.



A camada de incrustação quando ocorre de forma uniforme, pode proteger a tubulação da corrosão por evitar o contato com o meio corrosivo. Se o crescimento for descontínuo podem ocorrer diferentes concentrações de oxigênio em locais diferentes da tubulação, possibilitando a corrosão por aeração diferencial.

3.4.3 Índice de Saturação de Langelier (LSI)

Modelo de equilíbrio relacionado ao grau de saturação de carbonato de cálcio na água. O cálculo é feito pela diferença do pH e pHe, onde pHe é o pH de saturação do carbonato de cálcio (CAVAZANNA, 2012). O cálculo do LSI é dado pela Equação 1, e de pHe pela Equação 2, as indicações para os valores obtidos estão na Tabela 2.

$$\text{LSI} = \text{pH} - \text{pHe} \quad (1)$$

$$\text{pHe} = (9,3 + \text{A} + \text{B}) - (\text{C} + \text{D}) \quad (2)$$

$$\text{A} = (\log_{10}[\text{SDT}] - 1) / 10 \quad (3)$$

$$\text{B} = [-13,12 \cdot \log_{10}(\text{T} + 273)] + 34,55 \quad (4)$$

$$\text{C} = \log_{10}[\text{Ca}^{2+}] - 0,4 \quad (5)$$

$$\text{D} = \log_{10}[\text{AT}] \quad (6)$$

Onde:

pH = pH da água medido

pHe = pH na saturação de carbonato de cálcio

SDT = Sólidos dissolvidos totais em mg.L^{-1}

Ca^{2+} = Concentração de cálcio em $\text{mgCaCO}_3.\text{L}^{-1}$

T = Temperatura em $^{\circ}\text{C}$

AT = Alcalinidade total em $\text{mgCaCO}_3.\text{L}^{-1}$

Tabela 2 – Classificação dos valores obtidos para LSI

Valor LSI	Indicação
> 4	Incrustação severa
3 – 4	Incrustação moderada
1 – 3	Incrustação suave
0,5 – 1	Incrustação muito suave
-0,5 – 0,5	Balanceado
-0,5 – -2	Corrosão suave
-2 – -5	Corrosão moderada
< -5	Corrosão severa

Fonte: CAVAZANNA, 2012.

3.4.5 Índice de Estabilidade de Ryznar (RSI)

Proposto em 1944, este índice também relaciona a saturação de carbonato de cálcio com o caráter corrosivo ou incrustante da água. A Equação 7 apresenta o cálculo do índice e a Tabela 3 as indicações para os valores obtidos.

$$\text{RSI} = 2\text{pHe} - \text{pH} \quad (7)$$

Tabela 3 – Classificação dos valores obtidos para RSI

Valor RSI	Indicação
< 4	Incrustação severa
4 – 5	Incrustação forte
5 – 6	Incrustação leve
6 – 7	Balanceado
7 – 7,5	Corrosão moderada
7,5 – 9	Corrosão forte
> 9,0	Corrosão severa

Fonte: CAVAZANNA, 2012.

4 MATERIAL E MÉTODOS

As coletas das amostras de águas subterrâneas foram realizadas em três municípios localizadas em diferentes regiões do estado do Ceará, em cada município foram coletadas cinco amostras de diferentes poços entre agosto e setembro de 2019.

As coletas seguiram os procedimentos descritos no Guia Nacional de Coleta e Preservação de Águas, Sedimentos e Efluentes da Agência Nacional de Águas (ANA, 2011).

As análises físico-químicas foram realizadas de acordo com o Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2012), para os parâmetros: pH à 25 °C, sólidos dissolvidos totais, dureza total, cálcio e condutividade à 25°C.

Todas as análises foram realizadas em duplicata e calculado o desvio padrão para uma maior confiabilidade dos resultados obtidos.

4.1 Determinação de pH à 25 °C (4500-H⁺ – APHA, 2012)

O equipamento foi calibrado com soluções tampão pH = 4,00 e 7,00 de acordo com o manual de instruções do fabricante.

Em um béquer de 100 mL adicionou-se a amostra homogeneizada. O eletrodo foi lavado com água destilada e seco com um papel macio. Fez-se a imersão do eletrodo na amostra e após a estabilização o resultado exibido no visor do pHmetro foi registrado.

4.2 Determinação de sólidos dissolvidos totais (2540 C – APHA, 2012)

A amostra homogeneizada foi filtrada e transferida para um cadinho de massa conhecida. Foi levada a estufa e evaporada a secura em 180 °C até o peso se tornar constante. Os sólidos dissolvidos totais (SDT) são quantificados pelo aumento de massa em relação à massa inicial do cadinho. O valor de SDT foi dado pela Equação 8:

$$\text{SDT (mg/L)} = (A - B) \times 1000 / V_{\text{amostra}} \quad (8)$$

Onde:

A = Peso do cadinho + resíduo seco (mg)

B = Peso do cadinho (mg)

V_{amostra} = Volume da amostra (mL)

4.3 Determinação de dureza total e cálcio (2340 C e 3500-Ca B – APHA, 2012)

As determinações de dureza total e cálcio foram realizadas por titulação de complexação da amostra com EDTA.

4.3.1 Preparo de solução tampão pH 10

Pesou-se 67,6 g de cloreto de amônio (NH_4Cl), dissolvendo-o em 572 mL de hidróxido de amônio (NH_4OH). Transferiu-se a solução para um balão volumétrico de 1L, que foi aferido com água destilada.

4.3.2 Preparo de solução de EDTA 0,01 mol.L⁻¹

Pesou-se 3,723 g de EDTA dissódico dihidratado P.A. que foi dissolvido em água destilada. Transferiu-se para um balão volumétrico de 1 L e aferiu-se.

4.3.3 Padronização da solução de EDTA 0,01 mol.L⁻¹

Pipetou-se 20 mL da solução padrão de óxido de zinco (ZnO) 0,01 mol.L⁻¹ para um erlenmeyer. Adicionou-se 20 mL de água destilada a seguir acrescentou-se 5 mL de hidróxido de amônio P.A. por fim, foi adicionada uma pitada de negro de eriocromo T e titulou-se com a solução de EDTA 0,01 mol.L⁻¹ até mudança de coloração de rosa para azul. O fator foi calculado pela Equação 9:

$$F = (M_{\text{ZnO}} \times V_{\text{ZnO}}) / (M_{\text{EDTA}} \times V_{\text{EDTA}}) \quad (9)$$

Onde:

F = Fator de correção da solução de EDTA 0,01 mol.L⁻¹

M_{ZnO} = Concentração da solução de ZnO 0,01 mol.L⁻¹

V_{ZnO} = Volume da solução de ZnO 0,01 mol.L⁻¹

M_{EDTA} = Concentração da solução de EDTA 0,01 mol.L⁻¹

V_{EDTA} = Volume gasto da solução de EDTA 0,01 mol.L⁻¹ na titulação

4.3.4 Procedimento para determinação de dureza total (DT)

A dureza da água está relacionada a concentração de sais de cálcio e magnésio. O grau de dureza total de cada amostra é obtido pela determinação da concentração total de Ca^{2+} e Mg^{2+} através da titulação de complexação.

Inicialmente 50 mL da amostra foram pipetados para um erlenmeyer de 250 mL, onde a solução tampão (hidróxido de amônio e cloreto de amônio) foi adicionada para obter-se $\text{pH} = 10$. As amostras foram cobertas para evitar a volatilização do tampão e foi adicionada uma pitada do indicador eriocromo T. A solução foi titulada com EDTA $0,01 \text{ mol.L}^{-1}$, até a mudança de coloração de vinho para azul. As Reações 8 e 9 ilustram as reações de complexação ocorridas durante a análise, onde Y simboliza o EDTA:



A dureza total será expressa em ($\text{mg CaCO}_3.\text{L}^{-1}$), segundo a Equação 10:

$$\text{DT} (\text{mgCaCO}_3.\text{L}^{-1}) = V_{\text{médio}} \times F \times M \times 1000 / V_{\text{amostra}} \quad (10)$$

Onde:

$V_{\text{médio}}$ = Volume médio gasto da solução EDTA $0,01 \text{ mol.L}^{-1}$ na titulação

F = Fator de correção da solução de EDTA $0,01 \text{ mol.L}^{-1}$

M = Concentração da solução de EDTA $0,01 \text{ mol.L}^{-1}$

V_{amostra} = Volume utilizado da amostra na titulação

4.3.5 Procedimento para determinação de dureza de cálcio

Para determinação de Ca^{2+} , 50 mL da amostra foram pipetados para um erlenmeyer, onde foram adicionados 2 mL de uma solução de hidróxido de sódio 10%, para ajustar o pH para 7, e o indicador murexida. A titulação com EDTA foi realizada até a mudança de coloração de róseo para lilás.

A dureza de cálcio será expressa em (mg CaCO₃.L⁻¹), segundo a Equação 11:

$$\text{Ca}^{2+} \text{ (mgCaCO}_3\text{.L}^{-1}\text{)} = V_{\text{médio}} \times F \times M \times 1000 / V_{\text{amostra}} \quad (11)$$

4.4 Determinação de alcalinidade parcial (AP) e total (AT)

A determinação de alcalinidade foi realizada de acordo com Macedo (2003), por titulação de neutralização da amostra com uma solução de ácido sulfúrico (H₂SO₄) 0,01 mol.L⁻¹, utilizando-se os indicadores fenolftaleína e alaranjado de metila.

4.4.1 Solução padrão de carbonato de sódio 0,01 mol.L⁻¹

Pesou-se, com o auxílio de um béquer, 1,0599 g de carbonato de sódio (Na₂CO₃) previamente seco. Com o auxílio de um bastão, dissolveu-se o cloreto de potássio em 500 mL de água destilada. Transferiu-se para balão de 1 L e aferiu-se.

4.4.2 Solução alcoólica de fenolftaleína 0,5%

Dissolveu-se 1,0 g de fenolftaleína em 199 mL de álcool etílico.

4.4.3 Solução de alaranjado de metila 0,1 %

Com o auxílio de um béquer, pesou-se 0,1 g de alaranjado de metila; a seguir foi feita a diluição em 50 mL de água quente. Após esfriar completou-se o volume para 100 mL com água destilada.

4.4.4 Solução de ácido sulfúrico 0,01 mol.L⁻¹

Pipetou-se 0,6 mL de ácido sulfúrico concentrado, transferindo para um balão volumétrico de 1 L e aferiu-se com água destilada.

4.4.5 Padronização da solução de ácido sulfúrico 0,01 mol.L⁻¹

Transferiu-se 20 mL da solução padrão de carbonato de sódio 0,01 mol.L⁻¹ para um erlenmeyer de 250 mL, então adicionou-se 0,5 mL de alaranjado de metila 0,1 %. Titulou-se com a solução de ácido sulfúrico até a mudança de coloração amarela para alaranjada.

4.4.6 Procedimento para análise de alcalinidade

Pipetou-se 50 mL da amostra em um erlenmeyer de 250 mL, foram adicionadas 6 gotas da solução alcoólica de fenolftaleína. As soluções que apresentaram coloração rósea foram tituladas com ácido sulfúrico 0,01 mol.L⁻¹ até se tornarem incolores. Nessa etapa é determinada a alcalinidade parcial, que é referente a presença de íons hidróxidos e carbonatos. As Reações 10 e 11 são referentes a alcalinidade hidróxidos e a Reação 12 à alcalinidade de carbonatos.



A alcalinidade parcial será expressa em mg CaCO₃.L⁻¹, segundo a Equação 12:

$$\text{AP (mg CaCO}_3\text{.L}^{-1}) = V_{\text{médio}} \times F \times M \times 1000 / V_{\text{amostra}} \quad (12)$$

Onde:

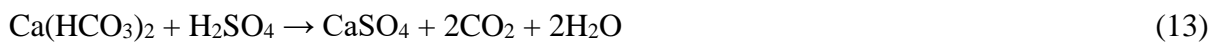
$V_{\text{médio}}$ = Volume médio gasto da solução de H₂SO₄ 0,01 mol.L⁻¹ na titulação

F= Fator de correção da solução de H₂SO₄ 0,01 mol.L⁻¹

M = Concentração da solução de H₂SO₄ 0,01 mol.L⁻¹

V_{amostra} = Volume utilizado da amostra na titulação

Após a determinação da alcalinidade parcial são adicionadas 9 gotas da solução de alaranjado de metila na mesma solução, que é titulada com ácido sulfúrico 0,01 mol.L⁻¹ até a coloração mudar de amarelo para laranja. Nessa etapa é determinada a alcalinidade total, que indica a presença de íons bicarbonatos, representados nas Reações 13 e 14.



A alcalinidade total será expressa em mg $\text{CaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$, segundo a Equação 13:

$$\text{AT (mg CaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}) = V_{\text{médio}} \times F \times M \times 1000 / V_{\text{amostra}} \quad (13)$$

4.5 Determinação da condutividade (2510 B – APHA, 2012)

O equipamento foi calibrado segundo o manual de instruções do fabricante. Transferiu-se um volume de amostra homogeneizada para um béquer de 100 mL. Lavou-se o eletrodo com água destilada e secou-se com papel macio. O eletrodo foi então imerso na amostra, após a estabilização o valor foi anotado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Tabelas 4, 5 e 6, apresentam os resultados das regiões Norte, Sertão e Sul respectivamente, as tabelas contém os valores de alcalinidade total (AT), dureza total (DT), cálcio, pH à 25 °C, condutividade à 25 °C e sólidos dissolvidos totais (SDT), para as quinze amostras de águas de poços analisadas.

Tabela 4 – Resultados médios obtidos para o município localizado na região Norte.

Parâmetros	Norte					CONAMA nº 396 / PRC nº 05
	NT1	NT2	NT3	NT4	NT5	
Alcalinidade total (mgCaCO ₃ L ⁻¹)	61,8	53,9	235,4	123,7	353,1	*
Dureza total (mgCaCO ₃ L ⁻¹)	22,1	54,1	158,4	2.606,5	571,4	≤ 500,0
Cálcio (mgCaCO ₃ L ⁻¹)	10,0	20,1	128,3	751,9	130,3	*
pH à 25°C	6,43	6,60	6,62	6,07	6,84	*
Condutividade (microS.cm ⁻¹)	425	314	1.083	6.137	2.424	*
Sólidos dissolvidos totais (mg.L ⁻¹)	239,3	176,6	609,0	3.452	1.363	≤ 1.000,0

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 5 – Resultados médios obtidos para o município localizado na região do Sertão.

Parâmetros	Sertão					CONAMA nº 396 / PRC nº 05
	ST1	ST2	ST3	ST4	ST5	
Alcalinidade total (mgCaCO ₃ L ⁻¹)	273,3	265,3	363,1	486,8	309,2	*
Dureza total (mgCaCO ₃ L ⁻¹)	421,1	661,7	431,1	491,2	2.225,6	≤ 500,0
Cálcio (mgCaCO ₃ L ⁻¹)	421,1	601,5	350,9	431,1	1.774,4	*
pH à 25°C	7,45	7,27	7,73	7,64	7,27	*
Condutividade (microS.cm ⁻¹)	1.879	2.969	2.438	2.848	7.884	*
Sólidos dissolvidos totais (mg.L ⁻¹)	1.057	1.670	1.371	1.602	4.435	≤ 1.000,0

Fonte: elaborada pelo autor.

Tabela 6 – Resultados médios obtidos para o município localizado na região Sul.

Parâmetros	Sul					CONAMA nº 396 / PRC nº 05
	SL1	SL2	SL3	SL4	SL5	
Alcalinidade total (mgCaCO ₃ L ⁻¹)	53,9	79,8	81,8	117,7	227,4	*
Dureza total (mgCaCO ₃ L ⁻¹)	206,5	533,3	549,4	473,2	607,5	≤ 500,0
Cálcio (mgCaCO ₃ L ⁻¹)	12,0	120,3	226,5	142,3	48,0	*
pH à 25°C	6,80	6,34	6,58	6,83	7,20	*
Condutividade (microS.cm ⁻¹)	572	1.345	1.484	2.576	1.488	*
Sólidos dissolvidos totais (mg.L ⁻¹)	220,0	1.180	810,0	1.770	670,0	≤ 1.000,0

Fonte: elaborada pelo autor.

A Resolução CONAMA nº 396 de 2008, determina que o valor máximo permitido de sólidos dissolvidos totais para consumo humano é de 1000 mg.L⁻¹. Para os resultados obtidos é observado que duas amostras da região Norte (NT4 e NT5), as cinco amostras da região do Sertão (ST1, ST2, ST3, ST4 e ST5) e duas amostras da região Sul (SL2 e SL4) apresentam valor superior ao limite, sendo impróprias para o consumo humano sem tratamento adequado.

A PRC nº 05 de 2017 do Ministério da Saúde apresenta como valor máximo de dureza total 500 mg.L⁻¹ para consumo humano, as amostras NT4, NT5, ST2, ST5, SL2, SL3 e SL5, não são apropriadas para consumo humano sem tratamento.

Os valores de pH das amostras das regiões Norte e Sul possuem valores abaixo de 7,0 em nove das dez amostras, indicando uma maior acidez e um caráter corrosivo. Na região do Sertão as amostras possuem valores de pH maiores que 7,0 favorecendo a precipitação do Ca²⁺ como carbonato de cálcio, favorecendo assim a ocorrência de incrustação.

Os altos valores de alcalinidade total, cálcio e sólidos dissolvidos totais das amostras da região do Sertão, característicos do terreno cristalino, em relação as amostras do Norte e Sul de terreno sedimentar, também indicam a propensão à incrustação.

Na Tabela 7 estão indicados os valores do Índice de Saturação de Langelier (LSI) e Índice de Estabilidade de Ryznar (RSI).

Tabela 7 – Valores e indicações de LSI e RSI

Amostra	Valor (LSI)	Indicação (LSI)	Valor (RSI)	Indicação (RSI)
NT1	-2,70	Corrosão moderada	11,84	Corrosão severa
NT2	-2,28	Corrosão moderada	11,16	Corrosão severa
NT3	-0,87	Corrosão suave	8,35	Corrosão forte
NT4	-1,00	Corrosão suave	8,08	Corrosão forte
NT5	-0,50	Balanceado	7,84	Corrosão forte
ST1	0,52	Incrustação muito suave	6,41	Balanceado
ST2	0,46	Balanceado	6,35	Balanceado
ST3	0,83	Incrustação muito suave	6,06	Balanceado
ST4	0,95	Incrustação muito suave	5,73	Incrustação leve
ST5	0,96	Incrustação muito suave	5,36	Incrustação leve
SL1	-2,31	Corrosão moderada	11,42	Corrosão severa
SL2	-1,67	Corrosão suave	9,69	Corrosão severa
SL3	-1,13	Corrosão suave	8,84	Corrosão forte
SL4	-0,96	Corrosão suave	8,75	Corrosão forte
SL5	-0,73	Corrosão suave	8,67	Corrosão forte

Fonte: elaborada pelo autor.

Na região Norte e Sul, tanto os valores de LSI como os valores de RSI indicam o caráter corrosivo das águas. Na região Norte o valor de LSI indicou que 80% das amostras possuem caráter corrosivo (40% corrosão moderada, 40% corrosão suave e 20% balanceado), os valores de RSI indicam que 100% das águas são corrosivas (40% corrosão severa, 60% corrosão forte). Na região Sul o 100% das amostras são de caráter corrosivo segundo o valor de LSI (20% corrosão moderada e 80% corrosão suave) e também 100% segundo os valores de RSI (40% corrosão severa, 60% corrosão forte).

Na região do Sertão os índices indicam a ocorrência de incrustação, o resultado é esperado visto que os poços se encontram em terreno cristalino. Os valores de LSI indicam que 80% das amostras apresentam incrustação muito suave e 20% são balanceadas. O resultado dos valores de RSI indicam que 40% das amostras possuem caráter incrustante leve e 60% são balanceadas.

6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos demonstram que nove amostras possuem sólidos dissolvidos totais superiores ao limite da Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), sendo impróprias para o consumo humano. Com base na PRC nº 05 de 2017 do Ministério da Saúde, sete amostras possuem valores de dureza total acima do permitido, sendo também impróprias para consumo. Com base nos dois parâmetros, onze das quinze amostras coletadas são impróprias para consumo.

O Índice de Saturação de Langelier (LSI) indica que 80% das amostras do município da região Norte e 100% das amostras do município da região Sul resultaram em corrosividade. O Índice de Estabilidade de Ryznar (RSI) indica que 100% das amostras de água de ambas as regiões são corrosivas. Pode-se concluir que as águas subterrâneas das duas localidades são corrosivas. Na região do Sertão os valores de LSI indicam incrustação muito suave em 80% das amostras e os valores RSI indicam que 40% das amostras são propensas a incrustação leve, assim a água subterrânea dessa região possui caráter levemente incrustante.

A manutenção e utilização de métodos de proteção contra a corrosão são indicados para os sistemas de exploração das regiões Norte e Sul do Ceará, pois a agressividade das águas pode danificar esses sistemas, ocorrendo rompimento de tubulação dos poços e motobomba. Na região do Sertão a limpeza regular dos encanamentos é necessária, pois a formação de incrustações pode diminuir a vazão de água e danificar equipamentos.

REFERÊNCIAS

ANA. Agência Nacional de Águas. **Guia Nacional de Coleta e Preservação de Águas, Sedimentos e Efluentes**. 2011.

APHA. **Standard Methods for the Examinations of Water and Wastewater**. American Public Associations. 23th Washington DC. 2013

BRASIL. Agência Nacional de Águas (ANA). **Água subterrânea**. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/panorama-das-aguas/quantidade-da-agua/agua-subterranea>> Acesso em: 10 out. 2019

BRASIL. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). **Noções básicas sobre poços tubulares**. Disponível em: <https://www.cprm.gov.br/publique/media/hidrologia/mapas_publicacoes/Nocoas_Basicas_Pocos_Tubulares.pdf> Acesso em: 18 out. 2019

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA nº 396**, de 03 de abril de 2008. Brasília, 2008.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria de Consolidação PRC nº 05**, de 28 de setembro de 2017. Brasília, 2017.

CAVAZANNA, G. H. **Análise de agressividade e incrustação das águas subterrâneas na região urbana de Campo Grande - MS**. Águas subterrâneas, v. 26, n. 1, p. 83-97, 2012.

CEARÁ. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará (IPECE). **Mapa geológico simplificado do Ceará**. Disponível em: <http://www2.ipece.ce.gov.br/atlas/capitulo1/12/pdf/Mapa_Geologico_Simplificado.pdf> Acesso em: 15 set. 2019

CEARÁ. Secretaria dos Recursos Hídricos. **Plano de Ações Estratégicas de Recursos Hídricos do Ceará**. Fortaleza, 2018.

DAVIS, S. N.; DE WIEST, R. J. M. **Hydrogeology**. John Wiley & Sons, p. 463. New York, 1966.

FREEZE, R A.; CHERRY, J. A. **Groundwater**. Englewood Cliffs, N.J: Prentice-Hall, 1979.

GENTIL, V. **Corrosão**. 3. ed., LTC: Rio de Janeiro, 1996.

MACEDO, J. A. B. de. **Métodos laboratoriais de análises físico-químicas e microbiológicas**. 2ª Edição. Editado por CRQ-MG. Belo Horizonte, 2003. 450 p.

SOBRINHO, P. T. **Estrutura geológica do Ceará**. Revista do Instituto do Ceará. Disponível em: <https://www.institutoceara.org.br/revista/Rev-apresentacao/RevPorAno/1941/1941-Estrutura_Geologica_do_Ceara.pdf> Acesso em: 15 out. 2019