

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO



ARYANE MOTA DE OLIVEIRA

**Modelagem do Avanço da Cunha Salina em Sistema Aquífero Costeiro**

Maceió  
2016

ARYANE MOTA DE OLIVEIRA

**Modelagem do Avanço da Cunha Salina em Sistema Aquífero Costeiro**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Cleuda Custódio  
Freire

Maceió

2016

**Catálogo na fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**  
**Divisão de Tratamento Técnico**

Bibliotecário Responsável: Valter dos Santos Andrade

O48m Oliveira, Aryane Mota de.  
Modelagem do avanço da cunha salina em sistema aquífero costeiro /  
Aryane Mota de Oliveira. – 2016.  
72 f. : il.

Orientador: Cleuda Custódio Freire.  
Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Universidade  
Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em  
Recursos Hídricos e Saneamento. Maceió, 2016.

Bibliografia: f. 68-72.

1. Aquífero - Contaminação. 2. Aquífero - Salinidade. 3. Sólidos totais.  
4. SEAWAT. I. Título.

CDU: 628.19:556.33



## Folha de Aprovação

ARYANE MOTA DE OLIVEIRA

Modelagem do avanço da cunha salina em sistema aquífero costeiro

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento.

Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Cleuda Custódio Freire (Orientadora)

### Banca examinadora:

Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Rosângela Sampaio Reis  
(Examinador interno-PPGRHS-UFAL)

Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Joana D'Arc Freire de Medeiros (Examinadora externa - UFRN)

*Dedico este trabalho a minha mãe, Arlete Mota, que me incentivou desde quando ainda criança, sonhou comigo; a minha filha, Alice Mota, para que se inspire. Aos meus irmãos, para que percebam que quando desejamos realmente, tudo é possível.*

## AGRADECIMENTOS

Novamente encontro-me encerrando mais um ciclo da minha vida, o que me causa imensa satisfação, desta forma não poderia deixar de agradecer aos que de alguma forma contribuíram para que este momento.

A Deus, que foi muitas vezes o meu refúgio.

À minha família, pelos bons momentos, que faziam com que as horas mais difíceis valessem a pena, em especial a minha mãe, Arlete Mota, minha eterna gratidão, sem ela nada seria possível.

À minha orientadora, Cleuda Custódio Freire, grande incentivadora, agradeço a dedicação e conhecimentos transmitidos, o que proporcionou a produção deste trabalho.

Ao senhor Antônio Freire, pelas valiosas contribuições.

Aos professores do PPGRHS e CTEC, obrigado pela ajuda em minha formação.

Aos alunos Maurício Gomes e Ana Carolina Buarque, pela contribuição.

Aos amigos de sempre, Camilla Guimarães (sompamos muito), Jonas Rafael e Mariana Holanda, que em alguns momentos deixaram a jornada mais leve e apoiaram nos momentos difíceis.

Aos grandes amigos do PPGRHS, Pedro Omena (vulgo Passa, você é o cara!), Schay Macário, Milena Bandeira, colegas de sala e amigos incondicionais, palavras não conseguem definir tamanha parceria. Thiago Tavares, Amesson Marques e Fernando Nascimento, pela convivência e contribuições.

À galera do CLSW 300B, em especial Lucas Tardelly, Renata Braga 10, Camila Agra e Marconi Cavalcanti, sem vocês Brasília não teria sido tão legal, agradeço aos bons momentos.

À CAPES pela concessão de bolsa no mestrado.

À UFAL (professores e funcionários em geral) que me acolheu e foi minha segunda casa durante oito anos.

## RESUMO

A exploração indiscriminada de água subterrânea pode causar o colapso dos aquíferos costeiros. O objetivo deste trabalho foi aplicar um modelo, o código computacional SEAWAT, para avaliar o comportamento da cunha salina em Sistema Aquífero Costeiro, onde foi estudado o caso do Complexo Barreira/Marituba na costa de Parte da Região Metropolitana de Maceió-AL. Ademais foram analisados índices físico-químicos para caracterizar a região de estudo e verificar a fonte de contaminação salina. A calibração do modelo foi realizada em duas vertentes. A calibração de fluxo subterrâneo obteve um coeficiente de correlação entre cargas hidráulicas calculadas e observadas de 0,764 e a calibração de concentração de Sólidos Totais Dissolvidos, que possui valor muito próximo à concentração de sal, obteve um coeficiente de correlação de 0,682 para o ano de 2015. A partir de então foram analisados dois cenários distintos, que permitiram verificar o efeito da exploração de água subterrânea na cunha salina para o ano de 2025. O primeiro considerou a exploração existente até 2015, sem acréscimos de bombeamentos. Como resultado, verificou-se o avanço da cunha salina em duas áreas do domínio, uma área que sofre recuo, além da formação de cones com ascensão vertical da água do mar. No segundo cenário foram adicionadas as licenças de obras hídricas como poços e mais a hipótese de instalação de 32 novos poços de bombeamento, de acordo com o crescimento da cidade. Porém, neste caso, não foi possível visualizar variações na zona de mescla em relação ao primeiro cenário para o ano de 2025. A análise dos índices hidrogeológicos apontou para maiores concentrações de cloretos na região próxima à linha do Oceano Atlântico, com pouca influência do nitrato e, no geral, indicaram a existência de intrusão de água do mar.

**Palavras-Chave:** Contaminação. Salinidade de Aquíferos. Sólidos Totais Dissolvidos. SEAWAT.

## ABSTRACT

Groundwater overexploitation can cause the collapse of coastal aquifers. The goal of this study was to apply a template, the computer code SEAWAT to evaluate the behavior of the salt wedge Coastal Aquifer System, which has studied the case of complex Barreira/Marituba in Part Coast Metropolitan Region of Maceió-AL. In addition they were analyzed physicochemical indexes to characterize the study area and verify the source of salt contamination. The model calibration was performed in two parts. The underground flow calibration obtained a correlation coefficient between calculated hydraulic loads and observed of 0.764 and the calibration concentration of Total Dissolved Solids, which has very close to the salt concentration value, obtained a 0.682 correlation coefficient for the year 2015 . Since then analyzed two different scenarios, which allowed us to verify the effect of groundwater exploitation in the salt wedge for the year 2025. The first considered the existing exploitation by 2015 without pumping increments. As a result, it was found advancing saline wedge area into two areas, an area that suffers decrease, besides the formation of cones with vertical rise of the seawater. In the second scenario were added licenses of water works as well and plus the assumption of 32 new pumping wells installation, according to the city's growth. However, in this case, it was not possible to see variations in the mix zone for the first scenario for the year 2025. The analysis of hydrogeological indices pointed to higher chloride concentrations in the region close to the line of the Atlantic Ocean, with little influence of nitrate and, in general, showed the existence of seawater intrusion.

**Keywords:** Contamination. Salinity Aquifer. Total Dissolved Solids. SEAWAT.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Diagrama simplificado de um cenário de aquífero costeiro livre .....	16
<b>Figura 2</b> - Etapas da Modelagem.....	19
<b>Figura 3</b> – Área de Estudo e Identificação das Condições de Contorno .....	24
<b>Figura 4</b> – Precipitação Média Mensal .....	25
<b>Figura 5</b> – Mapa Geológico do Domínio.....	27
<b>Figura 6</b> – Perfil Geológico do Domínio .....	27
<b>Figura 7</b> – Etapas do Trabalho para Alcançar o Objetivo Geral .....	29
<b>Figura 8</b> – Estrutura de Poço Ativado .....	30
<b>Figura 9</b> – Localização de Pontos de Coleta .....	31
<b>Figura 10</b> – Área de Estudo com Eixo Rotacionado de Cargas Fixas.....	32
<b>Figura 11</b> – Perfil do Domínio.....	35
<b>Figura 12</b> – Poços de Obsevação de NE.....	35
<b>Figura 13</b> – Condutividade Hidráulica na Formação Barreira .....	38
<b>Figura 14</b> – Condutividade Hidráulica na Formação Marituba.....	38
<b>Figura 15</b> – Interpolação de STD utilizando ArcGis.....	41
<b>Figura 16</b> – Área de Estudo com Concentração Inicial.....	42
<b>Figura 17</b> – Área de Estudo com Concentração Constante .....	42
<b>Figura 18</b> – Perfil de Modelo com Concentração Inicial .....	43
<b>Figura 19</b> – Perfil de Estudo com Concentração Constante .....	43
<b>Figura 20</b> – Indicativo de Intrusão Salina.....	54
<b>Figura 21</b> – Modelo de Interação entre Aquífero e Água do Mar .....	55
<b>Figura 22</b> – Relação de Na/Cl por Cl .....	56
<b>Figura 23</b> – Relação Mg/Cl por Cl .....	56
<b>Figura 24</b> – Distribuição de Poços de Bombeamento no Domínio .....	57
<b>Figura 25</b> – Relação Nitrato e Cloretos .....	58
<b>Figura 26</b> – Variação Mensal de Cloretos .....	59

<b>Figura 27</b> – Modelo de Fluxo Subterrâneo no SEAWAT .....	60
<b>Figura 28</b> – Comparação entre as Cargas Hidráulicas Observadas e Calculadas com 8 Layers .....	61
<b>Figura 29</b> – Comparação entre as Cargas Hidráulicas Observadas e Calculadas com 8 Layers e Bombeamento .....	62
<b>Figura 30</b> – Comparação entre as Cargas Hidráulicas Observadas e Calculadas com 24 Layers .....	63
<b>Figura 31</b> – Superfície de Concentração de STD para o ano de 2015.....	64
<b>Figura 32</b> – Superfície de Concentração de STD para o ano de 2025.....	65
<b>Figura 33</b> – Modificações na Zona de Mescla em Detalhe .....	66
<b>Figura 34</b> – Perfil do Domínio para o ano de 2015 .....	67
<b>Figura 35</b> – Perfil do Domínio para o ano de 2025 .....	67
<b>Figura 36</b> – Superfície de Concentração de STD para o ano de 2025 com Acréscimo de 36 Poços.....	68

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Parâmetros para Avaliação da Fonte de Contaminação da Água Subterrânea .....	33
<b>Tabela 2</b> – Faixa de Valores de Permeabilidade Intrínseca e Condutividade Hidráulica para Vários Materiais Não Consolidados .....	37
<b>Tabela 3</b> – Vazões de Licença Hídrica e Hipotéticas que foram Adicionadas ao Cenário II.....	45
<b>Tabela 4</b> – Vazões de Licença Hídrica e Hipotéticas que foram Adicionadas ao Cenário II.....	46
<b>Tabela 5</b> – Inventário de Dados do Ano de 2012 .....	48
<b>Tabela 6</b> – Dados Inventariados do Ano de 2013.....	49
<b>Tabela 7</b> – Dados Inventariados do Ano de 2014.....	50
<b>Tabela 8</b> – Dados Amostrados no Ano de 2015 .....	52

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
2	<b>OBJETIVOS</b> .....	15
2.1	<b>Objetivo Geral</b> .....	15
2.2	<b>Objetivos Específicos</b> .....	15
3	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	15
3.1	<b>Intrusão da Cunha Salina</b> .....	15
3.2	<b>Principais indicadores de Salinização</b> .....	17
3.3	<b>Modelagem Matemática de Fluxo em Água Subterrânea</b> .....	19
3.4	<b>Método das Diferenças Finitas</b> .....	22
3.5	<b>Condições de Contorno</b> .....	23
4	<b>ÁREA DE ESTUDO</b> .....	23
4.1	<b>Aspectos Morfológicos e Hidrográficos</b> .....	24
4.2	<b>Aspectos Climáticos</b> .....	25
4.3	<b>Geologia Regional</b> .....	26
4.4	<b>Aspectos Hidrogeológicos</b> .....	28
4.5	<b>Salinização das Águas Subterrâneas na Cidade de Maceió</b> .....	28
5	<b>METODOLOGIA</b> .....	29
5.1	<b>Inventário de Poços</b> .....	29
5.2	<b>Coleta de Amostras</b> .....	30
5.3	<b>Análise da Qualidade da Água Subterrânea</b> .....	33
5.4	<b>Calibração do Modelo Computacional</b> .....	34
5.5	<b>Simulação de Cenários</b> .....	44
6	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	47
6.1	<b>Caracterização da Qualidade da Água Subterrânea</b> .....	47
6.2	<b>Modelo de Fluxo Subterrâneo no SEAWAT</b> .....	60

6.3	<b>Modelo de Concentração de Sal no SEAWAT .....</b>	63
7	<b>CONCLUSÕES.....</b>	69
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	70

## 1 INTRODUÇÃO

A região costeira é reconhecida como área de maior densidade populacional no mundo (CUSTODIO, 1987) e quando a água superficial não atende as necessidades, faz-se uso das águas subterrâneas. Aquíferos costeiros estão vulneráveis ao avanço da cunha salina, pois além da localização, podem sofrer superexploração e uma das possíveis causas é a falta de gestão. Segundo Bouderbala (2014) a salinização em aquíferos costeiros é muito preocupante e causa perdas econômicas substanciais, o que provoca a redução da qualidade de aquíferos de água doce.

Diversas são as finalidades de exploração da água subterrânea, como por exemplo: abastecimento humano, abastecimento industrial, dessedentação animal, irrigação, rebaixamento do lençol freático temporário. Visando atender as demandas de forma sustentável alguns instrumentos para controle e monitoramento dos usos foram criados: licença de obra hídrica, outorga de direito de uso da água e isenção de outorga. Desta forma, o órgão controla a perfuração de poços e vazão de outorga, os quais podem atingir as diversas formações hidrogeológicas, o que também é catalogado; porém ainda há grande número de perfuração de poços clandestinos.

Do ponto de vista hidrogeológico, foram definidos cinco sistemas aquíferos na região urbana de Maceió, são eles: Maceió, Marituba, Barreiras-Marituba, Marituba e Sedimentos de Praia e Aluvião. Os sistemas aquíferos Barreiras e Marituba, alvo do trabalho, isolados ou em conjunto, são considerados como de média potencialidade. Eles representam os principais aquíferos de Maceió, e vêm sendo exaustivamente explorados para abastecimento público, privado e industrial. Isto causa constante alteração no sentido original do fluxo subterrâneo, criando centros de fluxos radiais; além disso, o rebaixamento excessivo da superfície potenciométrica, em alguns bairros, está acarretando depleção das reservas permanentes e salinização pelo desequilíbrio da zona de mescla (ROCHA, 2005).

O parâmetro mais utilizado para qualificar a água de abastecimento quanto à salinização é o índice de cloretos, segundo a Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde de 12 de dezembro de 2011, a qual regulamenta os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Essa portaria estabelece como padrão de aceitação para consumo o valor máximo de 250 mg/L de cloreto na água potável (BRASIL, 2011). Para Custódio e Llamas (1983) a água subterrânea, sem sofrer intrusão salina, possui teores de cloretos inferiores a 100 mg/L em formações costeiras. Segundo Custódio (1987), um percentual de 3% de água do mar em água doce já restringe seu

uso e um percentual de 5% torna a água inutilizável, salvo quando há tratamentos de dessalinização, que são de alto custo.

Além do índice de Cloretos, outros índices são considerados pela comunidade científica para a identificação de contaminação pela água do mar, alguns deles são:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ , Condutividade Elétrica e Sólidos Totais Dissolvidos, assim como também algumas razões iônicas (BOUDERBALA, 2015; SHAHSAVARI et al., 2014; SINGARAJA et al., 2014; ZGHIBI et al., 2014; VINSON et al., 2011; CHANDRAJITH et al., 2013; FARID et al., 2013; HEM, 1985). Esta é uma forma pontual de identificar, através de coletas de água subterrânea em poços de exploração, a qualidade da água.

Uma forma mais abrangente de perceber o avanço da cunha salina no aquífero é a modelagem do sistema. Neste sentido, o SEAWAT é um programa que foi desenvolvido pela combinação do MODFLOW e MT3DMS para simular em três dimensões o fluxo subterrâneo com densidade variável utilizando a concentração de salinidade para estimar a densidade dos fluidos e assim determinar a intrusão da cunha salina no aquífero. A salinidade é representada pelos sólidos totais dissolvidos, por possuírem valores muito próximos (GUO e LANGEVIN, 2002). Além disso, o SEAWAT é um *software* que está sendo utilizado e fornece bons resultados (DING et al., 2014; COBANER et al., 2012), assim como também o FEFLOW, que trabalha com o mesmo princípio (KERROU et al., 2010; SEFEKNASR e SHERIF, 2014).

Não foram constatados estudos de modelagem que representem a salinização de sistema aquífero na área de interesse. A vulnerabilidade do aquífero na região urbana de Maceió/AL, bem como a constatação de salinização de alguns poços de captação de água subterrânea já foram alvos de estudo (SILVA, 2013; ROCHA, 2005). No entanto, ainda se percebe a carência de estudos que subsidiem a gestão dos mananciais subterrâneos no que diz respeito à intrusão salina.

O trabalho de Rocha (2005) foi realizado de forma pontual, através do método de Sondagens Elétricas Verticais, o qual mede a resistência elétrica da água, o mesmo indicou a salinização de baixo para cima, descartando a salinização por contaminação de nitrato. Além disso, sugere o zoneamento de regiões onde possam ser realizadas novos poços para exploração da água subterrânea de modo a não prejudicar ainda mais o aquífero. O trabalho realizado por Silva (2013) utilizou diferentes cenários para analisar a vulnerabilidade quanto à contaminação do aquífero de parte da Região Metropolitana de Maceió - RMM, porém não incluiu a intrusão salina dentro do seu contexto, sendo inclusive uma das sugestões para trabalhos futuros. A modelagem, incluindo a validação dos resultados, é um trabalho mais

completo, o qual expõe a condição atual do domínio de forma generalizada e pode simular um futuro quadro da região de acordo com o tempo e das condições impostas ao meio.

Neste contexto, o seguinte trabalho teve por objetivo modelar a salinização do sistema aquífero Barreira/Marituba em parte de parte da RMM. Para tanto, alguns cenários foram simulados considerando as explorações existentes e futuras utilizando o *software* SEAWAT. O primeiro visou verificar o avanço da cunha salina para o ano de 2025 considerando apenas os poços existentes até o ano de 2015; o segundo verificar esse avanço com a adição de poços hipotéticos e vazões de obra hídrica. Alguns índices e razões iônicas foram utilizados na tentativa de comprovar que a salinização advém, realmente, da água do mar.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

O seguinte trabalho teve por objetivo analisar a potencial contaminação da água subterrânea e verificar o comportamento da pluma de contaminação por intrusão salina em parte da Região Metropolitana de Maceió - RMM.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Caracterizar a água subterrânea através de índices físico-químicos;
- Refinar e adaptar calibração do modelo de fluxo subterrâneo realizada por Menezes Jr. (2011) para o modelo SEAWAT;
- Avaliar o potencial de contaminação por intrusão salina através de cenários estabelecidos.

## **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **3.1 Intrusão da Cunha Salina**

A maioria das grandes cidades brasileiras se localiza em áreas costeiras e faz uso de águas subterrâneas, porém nesses locais a exploração deve ser feita de modo bastante cauteloso, para evitar problemas com a intrusão marinha (FEITOSA e MANOEL FILHO, 2000).

Intrusão marinha é o nome dado ao avanço da cunha salina e ocorre quando a cunha da água do mar avança e se mistura com as águas doces do aquífero (CRUZ e SILVA JR., 2006).

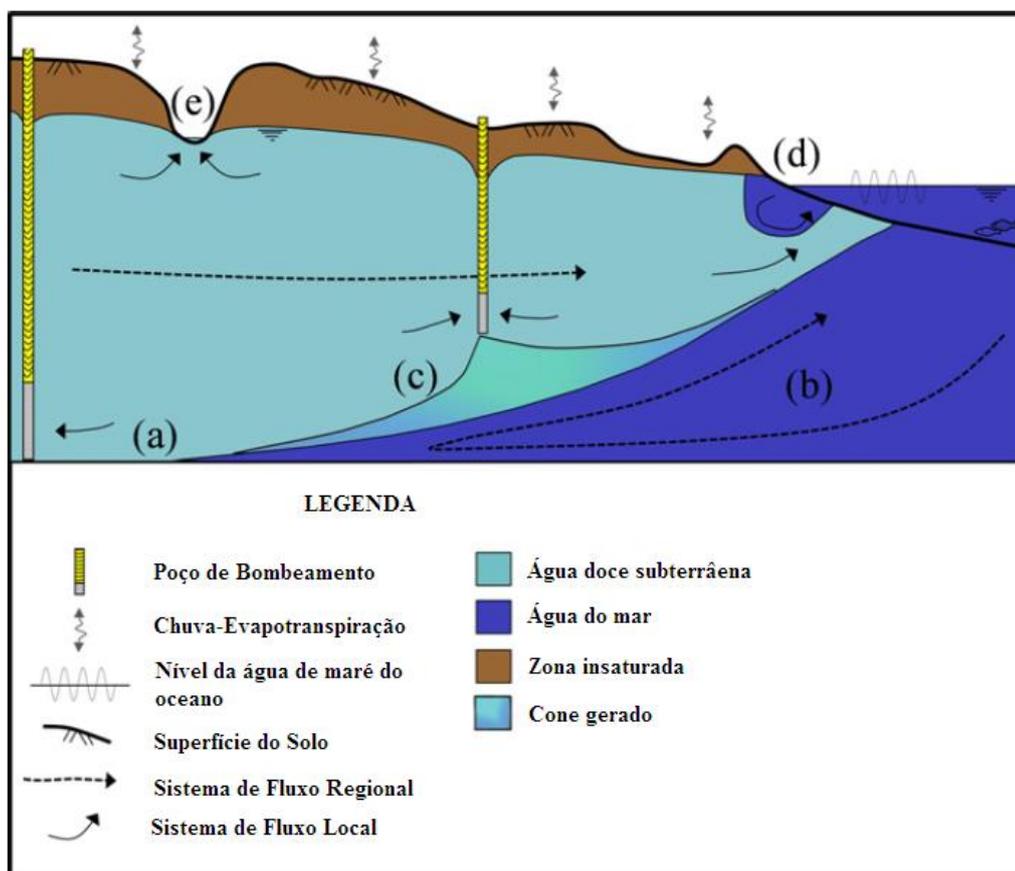
Em estado natural, antes de qualquer bombeamento, existe um gradiente hidráulico no aquífero que introduz um fluxo de água doce em direção ao mar, o que mantém a cunha salina em posição de equilíbrio. A água salgada, por possuir maior densidade, forma uma cunha

penetrando pela parte inferior da região de água doce. A água doce permanece em contínuo escoamento em direção ao mar, esta pressão consegue manter a posição da cunha salina equilibrada, sendo esta a zona de mescla. O bombeamento excessivo da água continental rompe o equilíbrio e ocorre o avanço da cunha (ALMEIDA e SILVA JR, 2007; FEITOSA e MANOEL FILHO, 2000).

Existe uma fragilidade quanto às áreas costeiras, onde os aquíferos podem ser facilmente contaminados, gerando um problema que pode ser irreversível. O intenso estresse dos recursos hídricos na região litorânea é causado pelo interesse de moradia na proximidade das praias, concentração de grandes cidades na costa do Brasil e até mesmo o lazer indiscriminado (ALMEIDA e SILVA JR, 2007; SILVA JR. et al., 2000).

A Figura 1 mostra como a implantação de poços de bombeamento em áreas costeiras afeta o equilíbrio da interface salina. Sendo (a) intrusão da cunha da água do mar; (b) Circulação de acordo com a densidade na zona da água do mar; (c) Formação de cone, devido ao bombeamento de água; (d) Zona de recirculação da água superior do mar; (e) Afloramento na superfície das águas subterrâneas (WERNER et al., 2013).

**Figura 1 – Diagrama simplificado de um cenário de aquífero costeiro livre**



Fonte – Adaptado de Werner et al. (2013)

Os problemas com os aquíferos costeiros estão relacionados com o seu gerenciamento inadequado, fato que pode causar o esgotamento das águas subterrâneas, assim como aumenta o risco da intrusão salina. Por representarem uma forma segura de armazenamento de água, as águas subterrâneas deveriam ser utilizadas apenas como reserva estratégica. Pequenas mudanças na carga e de fluxo podem causar grandes mudanças em aquíferos costeiros. A superexploração, por exemplo, pode agravar o avanço da cunha salina e destruir o aquífero como alternativa de fonte de abastecimento de água doce, portanto há necessidade de gerenciamento adequado (GURGEL et al., 2004; ANDRADE et al., 2012).

Para interpretar a fenomenologia de aquíferos sujeitos à intrusão marinha é necessária mensuração das propriedades físico-químicas das águas subterrâneas, isto auxilia na avaliação da dinâmica do avanço da cunha e sua intensidade (APPELO e POSTMA, 2005). A água pura não existe na natureza, sendo uma substância quimicamente muito ativa, que pode reagir com outras substâncias orgânicas e inorgânicas. As águas subterrâneas possuem propriedades próprias e permitem, através de análises físico-químicas, sua caracterização (CUSTÓDIO e LLAMAS, 1983).

### 3.2 Principais Indicadores de Salinização

- **Sódio ( $\text{Na}^+$ )**

Um dos metais alcalinos mais importantes e abundantes na água subterrânea, ocorrendo principalmente na forma de cloretos, sendo o principal causador da salinidade das águas naturais. A concentração de sódio aumenta gradativamente nas águas subterrâneas a partir da zona de recarga do aquífero em direção às porções mais confinadas ou dos seus exutórios. Sua concentração varia entre 0,1 e 10 mg/L nas águas subterrâneas, entre 1 e 150 mg/L em águas doces e alcançando 11.100 mg/L nas águas do Oceano Atlântico (CUSTÓDIO e LLAMAS, 1983).

- **Magnésio ( $\text{Mg}^{+2}$ )**

Responsável pela dureza e sabor salobro nas águas, ocorrendo sob a forma geral de bicarbonato. A água do oceano Atlântico possui concentração com valor médio de 1.410 mg/L, por outro lado as águas subterrâneas possuem valores entre 1 e 40 mg/L; a deficiência desta substância causa nervosismo e tremores e seu excesso provoca distúrbios intestinais, sendo maléfico para a saúde humana (CUSTÓDIO e LLAMAS, 1983).

- **Cloreto (Cl<sup>-</sup>)**

O cloreto, ânion Cl<sup>-</sup>, é encontrado naturalmente nas águas subterrâneas devido à percolação da água através de solos e rochas. Em geral, efluentes industriais apresentam altos níveis de cloretos, como a indústria do petróleo, algumas indústrias farmacêuticas, curtumes e etc. A intrusão da cunha salina em áreas costeiras, também, provoca altas concentrações de cloreto; no entanto, apenas apresenta risco ao ser humano em caso de deficiência no metabolismo do cloreto de sódio, que é o caso da insuficiência cardíaca congestiva (CETESB, 2015).

A Portaria n° 2.914 do Ministério da Saúde de 12 de dezembro de 2011 dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade e estabelece o valor máximo de 250 mg/L de cloreto permitido na água potável como padrão de aceitação de consumo (BRASIL, 2011).

As águas subterrâneas, em geral, apresentam teores de cloretos inferiores a 100 mg/L, porém as águas dos mares apresentam teores entre 18.000 e 21.000 mg/L (CUSTÓDIO e LLAMAS, 1983).

O cloreto causa prejuízos em estruturas hidráulicas, assim como também interfere na determinação de DQO (Demanda Química de Oxigênio) e nitratos, além de influenciar nas características dos ecossistemas aquáticos naturais, pois provocam alterações na pressão osmótica nas células dos microrganismos (CETESB, 2015).

- **Razão rMg<sup>+2</sup>/rCa<sup>+2</sup>**

As águas que circulam em litologia marinha ou sofreram intrusão da cunha salina têm esta razão elevada, pois a razão rMg<sup>+2</sup>/rCa<sup>+2</sup> da água do mar é em torno de 5. Altos valores de cloretos e desta razão podem indicar contaminação por água de origem marinha (CUSTÓDIO e LLAMAS, 1983). Segundo Hem (1985), quando esta razão possui valor acima de 0,9 indica contato com água do mar ou fluxo através de rocha básica; possível influência de terrenos dolomíticos.

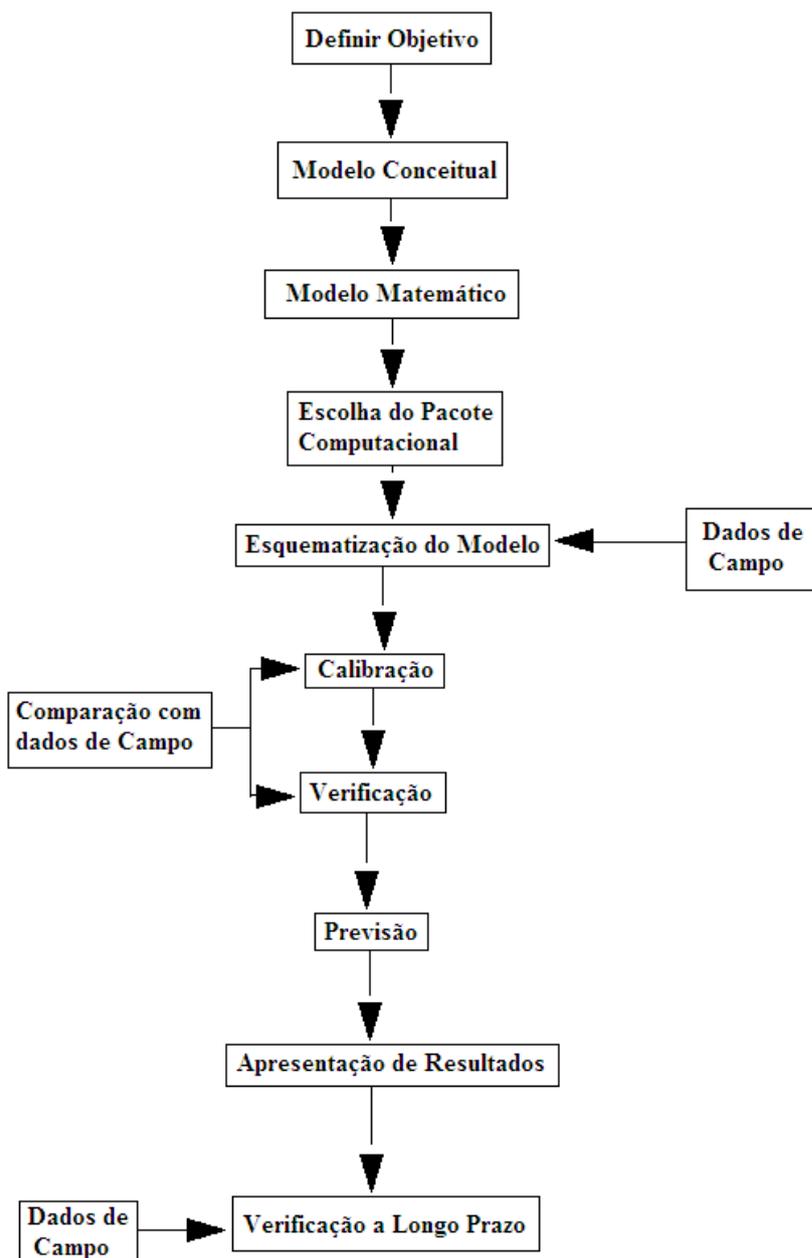
- **Razão rCl<sup>-</sup>/rHCO<sub>3</sub><sup>-</sup>**

Esta razão é muito útil na caracterização da intrusão salina. As águas continentais possuem valores aproximadamente entre 0,1 e 5, porém na água do mar os valores variam entre 20 e 50. Caso o aumento de cloretos seja causado pela concentração de sais nas zonas de recarga, o valor desta razão cresce muito menos para igual aumento de cloretos quando ocorre uma intrusão marinha (CUSTÓDIO e LLAMAS, 1983; HEM, 1985).

### 3.3 Modelagem Matemática de Fluxo em Água Subterrânea

A modelagem segue algumas etapas e podem ser demonstradas pelo fluxograma da Figura 2.

**Figura 2 - Etapas da Modelagem**



Fonte – Adaptado de Anderson e Woessner (1992)

Após definir os objetivos, deve-se elaborar o modelo conceitual, onde a geometria do sistema é estabelecida com suas camadas geológicas, seus contornos, suas interconexões hidráulicas, recargas e bombeamentos. Assim é definida a formulação matemática e pacote

computacional; a esquematização do modelo envolve a discretização do problema, seleção do intervalo de simulação (*time-step*), estabelecimento das condições de contorno, seleção inicial dos parâmetros do aquífero e verificação das recargas e bombeamentos. A calibração e verificação permite o ajuste dos parâmetros do modelo para produzir as cargas hidráulicas e fluxos medidos em campo; a previsão retorna resultados futuros do funcionamento do aquífero de acordo com bombeamentos e recargas futuras (FEITOSA e MANOEL FILHO, 2000).

O Visual MODFLOW (Modular Three-Dimensional Groundwater Flow Model), desenvolvido pela USGS, é um dos modelos matemáticos que mais se destacam para modelar fluxos subterrâneos e transporte de poluentes e utiliza o método das diferenças finitas; sendo o ambiente de modelagem mais completo para aplicações práticas no fluxo de águas subterrâneas e simulação de transporte de contaminantes. As ferramentas gráficas permitem (MENEZES JR., 2011):

- Dimensionar rapidamente o domínio do modelo e algumas unidades;
- Atribuir propriedades no modelo e condições de contorno;
- Executar simulações do modelo para o transporte de fluxo e de contaminantes;
- Calibrar o modelo, utilizando técnicas manuais ou automatizadas;
- Otimizar o bombeamento, recuperação e taxas locais;
- Visualizar os resultados utilizando gráficos 2D ou 3D, assim como também os parâmetros de entrada do modelo e em qualquer momento durante o processamento.

O MT3DMS funciona acoplado ao MODFLOW e possui capacidade de simular advecção, dispersão e as reações químicas entre os contaminantes no sistema de fluxo de águas subterrâneas com uma formulação implícita versátil e eficiente. A equação diferencial parcial que descreve o destino e transporte de contaminantes de espécies  $k$  em 3D e com sistemas de fluxo transitório das águas subterrâneas pode ser descrito pela Equação 1 (ZHENG E WANG, 1999).

$$\frac{\partial(\theta C^k)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \theta D_{ij} \frac{\partial C^k}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i C^k) + q_s C_s^k + \sum R_n \quad (1)$$

Onde:

$\theta$  = Porosidade do meio da superfície, adimensional;

$C^k$  = Concentração de espécies  $k$  dissolvidas,  $ML^{-3}$ ;

$t$  = Tempo, T;

$x_{i,j}$  = Distância ao longo das respectivas coordenadas no eixo Cartesiano, L;

$D_{ij}$  = Coeficiente tensor de dispersão hidrodinâmica,  $L^2T^{-1}$ ;

$v_i$  = Infiltração ou velocidade linear da água nos poros,  $LT^{-1}$ ; está relacionado com a descarga específica ou fluxo de Darcy através da relação,  $v_i = q_i/\theta$ ;

$q_s$  = Vazão volumétrica por unidade de volume do aquífero,  $T^{-1}$ ;

$C_S^K$  = concentração da fonte ou dissipador de fluxo para as espécies k,  $ML^{-3}$ ;

$\sum R_n$  = Termo da reação química,  $ML^{-3}T^{-3}$ .

O SEAWAT é um programa de computador para simulação em três dimensões, densidade variável e fluxo de água subterrânea transitória em meios porosos, o qual combina o MODFLOW e MT3DMS em um único programa de computador de modo que consegue simular a intrusão salina em aquíferos de água doce. Para tanto, o MT3DMS foi acoplado diretamente ao SEAWAT de forma a complementar a limitação no termo de dispersão, esse recurso recebeu a denominação de Processo de Transporte Integrado MT3DMS (IMT); desta forma possibilita ao usuário executar a constante densidade ou densidade variável fluid e simular transportes em um mesmo programa (LANGEVIN et al., 2003; LANGEVIN et al., 2008). O processo de IMT pode simular o transporte de soluto para um sistema de duplo domínio, como um aquífero fraturado ou altamente heterogêneo. A equação de transporte do soluto em duplo domínio formulado em termos de massa total está expresso na Equação 2 (LANGEVIN et al., 2003).

$$\theta_m \frac{\partial(C_m)}{\partial t} + \theta_{im} \frac{\partial(C_{im})}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta_m D_{ij} \frac{\partial C_m}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta_m v_i C_m)) + q_s C_s - q'_s C_m - \lambda_{l,im} \theta_{im} C_{im} \quad (2)$$

Onde:

$C_m$  = Concentração dissolvida no domínio móvel [ $ML^{-3}$ ];

$C_{im}$  = Concentração dissolvida no domínio imóvel [ $ML^{-3}$ ];

$\theta_m$  = Porosidade do domínio móvel, adimensional;

$\theta_{im}$  = Porosidade do domínio imóvel, adimensional;

$q_s$  = Taxa da origem do fluxo volumétrico e decaimento por unidade de volume do aquífero [ $T^{-1}$ ];

$q'_s$  = Taxa de variação do armazenamento transitório de água subterrânea [ $T^{-1}$ ];

$\lambda_{l,m}$  = Velocidade da reação de primeira ordem para a fase líquida móvel [ $T^{-1}$ ];

$\lambda_{l,im}$  = Velocidade da reação de primeira ordem para a fase líquida imóvel [ $T^{-1}$ ].

O SEAWAT exige como entrada alguns parâmetros hidrogeológicos, que são necessários para modelar o sistema; são eles, porosidade, concentração salina, densidade do fluido salino, densidade da água doce, condutividade hidráulica equivalente à água doce, dispersão longitudinal e transversal, coeficiente de difusão molecular (WATERLOO, 2006), os quais estão disponíveis em literatura.

Porém atingir o modelo de convergência utilizando o SEAWAT é uma tarefa difícil, pois exige muito tempo para verificar o valor e unidades para todos os parâmetros, além disso, o modelo possui problemas com células secas e necessita de uma atenção quanto a discretização temporal, principalmente quando há rápida mudança nas condições de contorno (GUO e LANGEVIN, 2002).

### **3.4 Método das Diferenças Finitas**

Dentre os métodos utilizados na atualidade, o método das diferenças finitas é o mais antigo, estudado e entendido pelos profissionais da área. Este tipo de modelo, numérico, tem suas funções definidas para determinados pontos do modelo, sendo que a posição e quantidade de pontos (ou nós) é realizada aleatoriamente, através da discretização. Cada nó representa uma região limitada (célula ou quadrícula) do aquífero, desta forma, os parâmetros atribuídos ao nó representará toda a célula; ou seja, quanto maior a quantidade de nós, mais o modelo está representando o realidade. Os pontos podem ser distribuídos nas células em três posições diferentes, assumindo a expressão algébrica de diferença progressiva, regressiva ou central. Como o objeto de estudo são águas subterrâneas, a malha (pontos) centrada no meio da célula é considerada mais eficiente (KINZELBACH, 1986).

É importante considerar o refinamento da malha de forma a gerar uma grade de trabalho com células pequenas, pois quanto menor a célula melhor serão os resultados do modelo; porém isso acarreta uma maior quantidade de equações a serem desenvolvidas e maior tempo de processamento, logo requer maior tecnologia. Portanto, recomenda-se que haja maior refinamento em regiões de interesse, deixando mais espaçada, a malha, nos locais mais distantes do foco. Pode-se considerar cada célula não sendo maior que uma vez e meio da célula vizinha, e o comprimento da célula não deve ultrapassar dez vezes sua largura (FEITOSA E MANOEL FILHO, 2000).

### 3.5 Condições de Contorno

As condições de contorno representam a relação do sistema com os sistemas circundantes; em um modelo de fluxo de águas subterrâneas as condições de contorno descrevem a troca de fluxo entre o modelo e os sistemas no entorno (MENEZES JR., 2011).

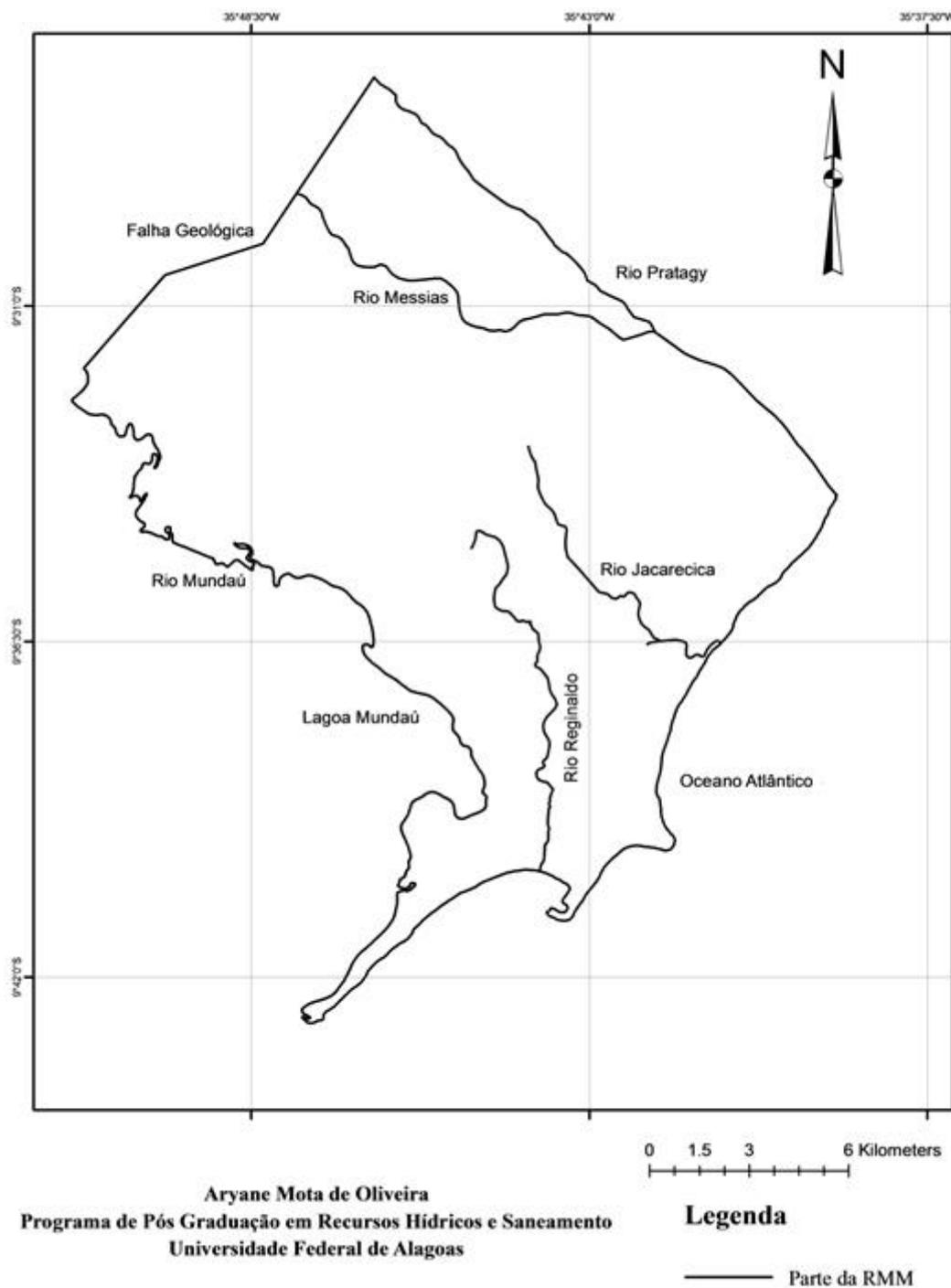
Estabelecer as condições de contorno é um passo crítico da modelagem, pois se forem mal estabelecidas podem levar a grandes erros nos resultados. As condições de contorno podem ser de dois tipos (FEITOSA E MANOEL FILHO, 2000):

- Contorno Físico: provocado por presença física com características a influenciar no escoamento subterrâneo, por exemplo, rochas impermeáveis, falhas geológicas e corpos d'água.
- Contorno Hidráulico: devido condições de escoamento; os exemplos mais comuns são os divisores de água e linhas de fluxo, em ambos os casos considera-se que o fluxo na direção perpendicular é nula.

## 4 ÁREA DE ESTUDO

O presente estudo foi realizado em parte da Região Metropolitana de Maceió – RMM, contemplando parte dos municípios de Rio Largo, Satuba e Santa Luzia do Norte, localizados no Estado de Alagoas; tal região situa-se em bacia sedimentar e limita-se ao norte com a Região Hidrográfica do Pratygy, ao sul com a Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú e o Complexo Lagunar Mundaú-Manguaba - CELMM, a oeste pela linha da falha principal no contato com o cristalino e a leste pelo oceano Atlântico, como pode ser observado na Figura 3 (MENEZES JR, 2011) e possui cerca de 292 km<sup>2</sup> (NOBRE, 2006). Esta mesma delimitação foi utilizada pelo Projeto ASUB (2011), o qual realizou alguns estudos voltados à água subterrânea.

**Figura 3 - Área de Estudo e Identificação das Condições de Contorno**



Fonte – Autor (2016)

#### **4.1 Aspectos Morfológicos e Hidrográficos**

A morfologia predominante na Cidade de Maceió inclui tabuleiros, vales e planícies litorâneas. A feição de tabuleiros, com altitudes em torno de 100 m, é regional predominante, ocupando aproximadamente 90% da área, os quais dão origem a vales com grandes

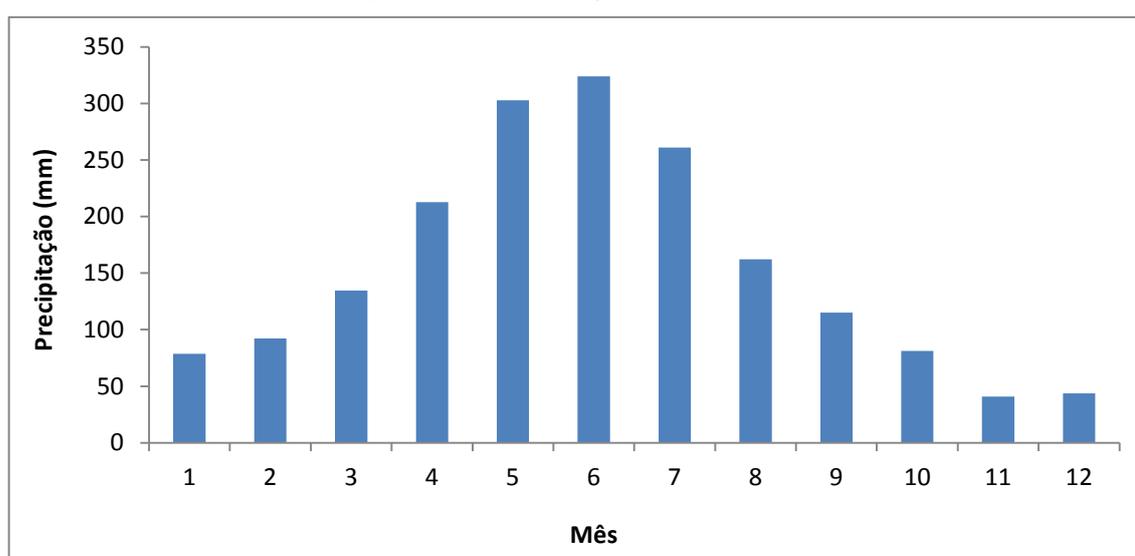
profundidades e vários córregos pouco extensos. Os afloramentos das formações pré-Barreiras são encontrados nas meia-encostas e talvegues. Os sedimentos de praia do Grupo Barreiras formam as planícies litorâneas, ou até mesmo sedimentos mais antigos (NOBRE, 2006; SALDANHA et al., 1980).

O rio Mundaú, com origem em Pernambuco, e riachos, por exemplo Cardoso e Catolé, que desaguam na Lagoa Mundaú caracterizam a rede hidrográfica. Os demais mananciais desaguam no oceano Atlântico, incluindo os riachos Reginaldo, Jacarecica, garça Torta, Riacho Doce e rio Pratygy. Os rios da área de estudo são perenes, pois se alimentam de águas subterrâneas que afloram em vales muito profundos, em forma de fontes, tendo uma contribuição da umidade advinda do oceano, sendo reduzido o escoamento superficial na bacia (NOBRE, 2006; SALDANHA et al., 1980).

#### 4.2 Aspectos Climáticos

A área de estudo está inserida em região de clima quente e úmido, com temperatura média anual em torno de 25 °C e índice de aridez de Martone igual a 40 (NOBRE, 2006; SALDANHA et al., 1980), possui regime de chuvas uniforme, sendo que apenas duas estações são bem definidas. Março a agosto representa o período da estação chuvosa, quando ocorre cerca de 75% da precipitação total anual (NOBRE, 2006). Estas estações podem ser observadas na Figura 4, através da precipitação média mensal da região.

**Figura 4 – Precipitação Média Mensal**



Fonte – Adaptado de INMET (2016)

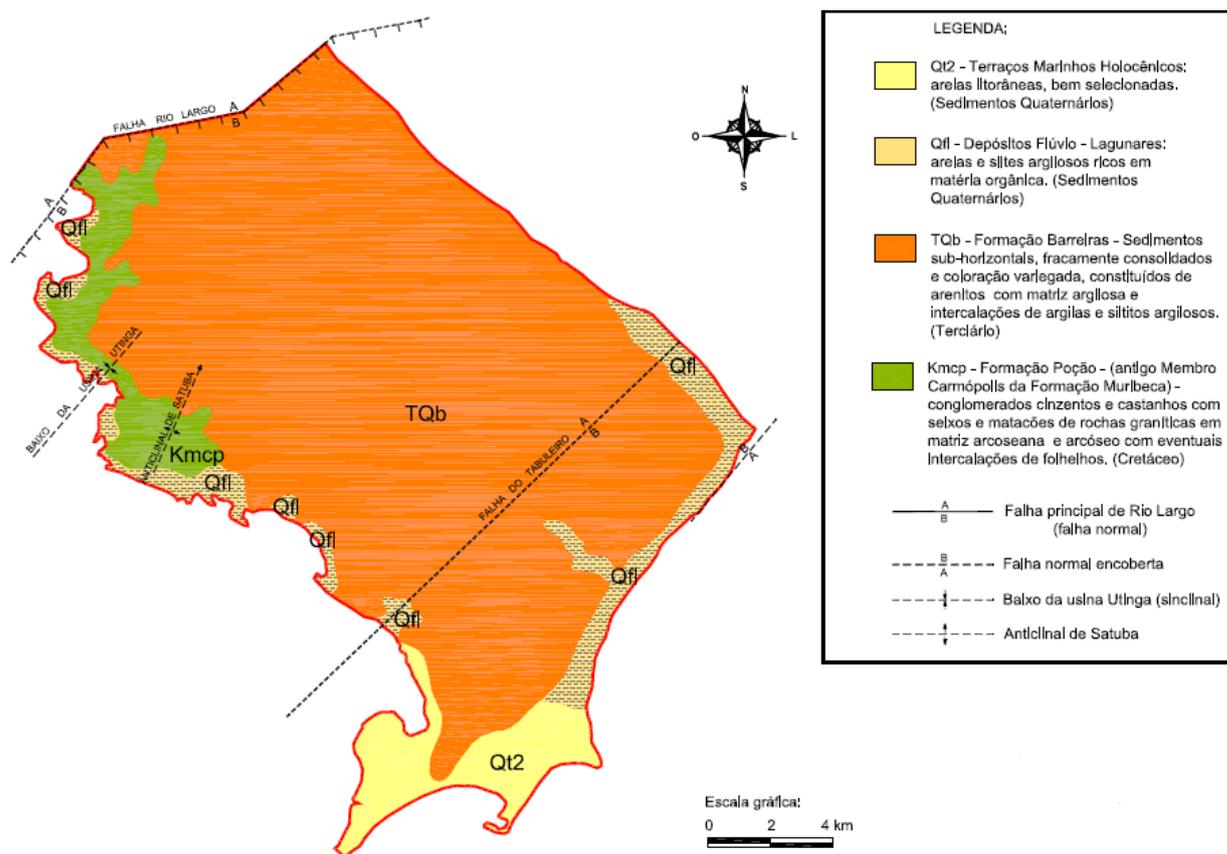
### 4.3 Geologia Regional

As bacias sedimentares de Alagoas e Sergipe ocorrem ao longo de litoral destes Estados, contemplando a RMM, objeto de estudo, sendo limitadas a oeste pela falha principal no contato com o cristalino, que aflora no interior do continente (LIMA, 1990). As bacias são alongadas em direção NE-SW e possuem 350 km de extensão e 35 km de largura média em terra; com área total de 44.370 km<sup>2</sup>, sendo 12.620 km<sup>2</sup> na porção terrestre (LOUREIRO, 2013).

Estas bacias são compostas por duas áreas de Geologia distintas, uma entre o litoral e um limite grosseiramente paralelo à linha litorânea, numa distância de 20 km, constituindo uma bacia sedimentar, e a outra entre a área sedimentar e os limites oeste do Estado, formada por rochas cristalinas. A região de interesse localiza-se em área sedimentar, apresentando rochas dos grupos clásticos, químico e orgânico. O embasamento da área sedimentar apresenta estruturas em “horst” e “graben”, numa profundidade superior a 6.000 metros. Há falhas nas camadas sedimentares, causadas pela gravidade (SALDANHA et al., 1990).

A camada de sedimentos na bacia de Alagoas, região de importância, é espessa, apresenta mergulho suave e grande variação faciológica; ordenado, pelas formações, da base ao topo da seguinte forma: Coqueiro Seco, Ponta Verde, Maceió, Porção, Marituba e Barreiras. Nas margens dos rios, lagoas e região litorânea são predominantes os sedimentos quaternários. As formações Barreiras e Marituba são as mais superficiais e constituem-se nos horizontes com maiores potenciais de fluxo e espessuras superiores a 200 m, sendo caracterizados pelo complexo de aquíferos Barreiras e Barreiras/Marituba (NOBRE, 2006). A Figura 5 mostra a formação geológica superficial da área de estudo, onde há predominância da formação Barreiras e a Figura 6 mostra um perfil da área de estudo, o qual sintetiza as formações geológicas existentes.

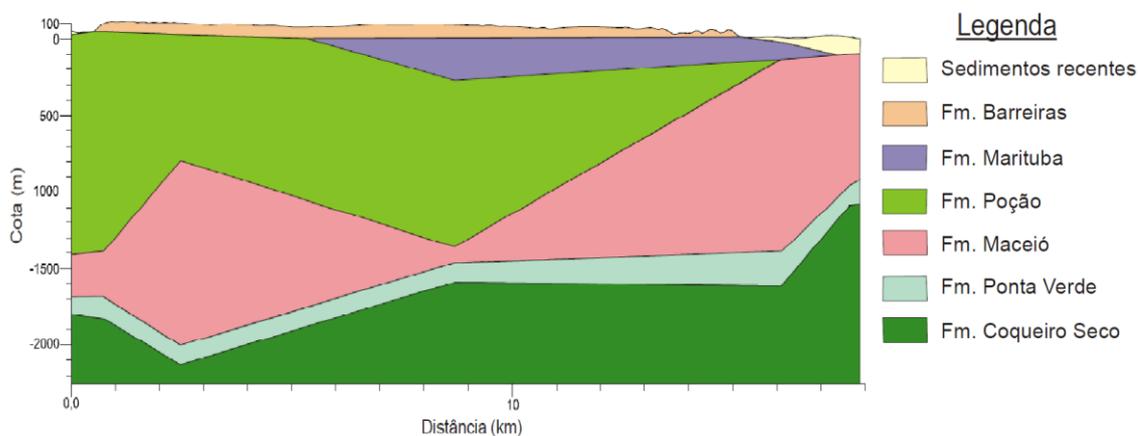
**Figura 5 – Mapa Geológico do Domínio**



Fonte – Nobre (2006)

A Figura 6 apresenta um perfil geológico que sintetiza a formação geológica no domínio de acordo com a profundidade.

**Figura 6 - Perfil Geológico do Domínio**



Fonte – Adaptado de ANA (2011)

#### 4.4 Aspectos Hidrogeológicos

A litologia do sistema aquífero de Maceió é composta por uma sucessão de camadas areníticas intercaladas por camadas argilosas. Este sistema compreende três formações, Barreiras, Marituba e Poção, onde as duas primeiras estão hidraulicamente interligadas, logo compõem um “sistema aquífero” Maceió, compondo um ambiente geológico heterogêneo. As duas primeiras formações constituem excelentes aquíferos, por apresentarem grandes espessuras de arenitos e areias, se sobressaindo em relação às demais formações, em relação à transmissibilidade de fluidos (NOBRE, 2006; NOBRE E NOBRE, 2001), que são as camadas mais exploradas em parte da RMM.

A formação Barreiras apresenta melhor desempenho, pois seus sedimentos clásticos são, geralmente, espessos e saturados, isso em regiões de tabuleiros. Apresentando, em geral, comportamento livre e espessura homogênea, podendo alcançar 150 m (NOBRE, 2006).

Aquíferos convencionais apresentam condutividade hidráulica entre  $10^{-3}$  a  $10^{-2}$  cm/s e produção na ordem de 40 m<sup>3</sup>/h. O sistema Barreiras/Marituba, tendo os dois horizontes permeáveis, atingem valores de produção em torno de 300 m<sup>3</sup>/h; além disso, foram verificadas potencialidades hidráulicas excelentes, com valores de condutividade hidráulica que variam de  $10^{-3}$  a  $10^{-1}$  cm/s; onde a recarga do sistema é dada através de infiltração direta da precipitação, principalmente na época de inverno (NOBRE, 2006; NOBRE e NOBRE, 2001).

#### 4.5 Salinização das Águas Subterrâneas na Cidade de Maceió

Estudos realizados por Rocha (2005) em grande parte da região urbana de Maceió concluíram que alguns de seus bairros fazem grande uso de águas subterrâneas, acarretando uma depleção das reservas permanentes, desta forma há o avanço da cunha salina, que é provocada pelo desequilíbrio da zona de interface salina. O sistema aquífero Barreiras, considerado com águas de boa qualidade, está sendo gradativamente contaminado por águas salinizadas da Formação Marituba, em algumas áreas; a superexploração vem causando ascensão vertical do cone salino. Este processo é mais atuante nos sistemas de aquíferos Maceió, Marituba, Barreiras/Marituba e Barreiras, principalmente nos locais onde se encontram as baterias de poços operados pela CASAL – Companhia de Saneamento de Alagoas. Além disso, foi constatado que grande parte dos problemas com salinização das águas subterrâneas estão relacionados a uma gestão ineficiente. Uma gestão ineficiente e/ou inexistente pode causar (ROCHA, 2005):

- Exploração excessiva em relação à recarga do aquífero, causada pela perfuração de poços em formações com alta transmissividade. Por vezes a vazão explorada não é

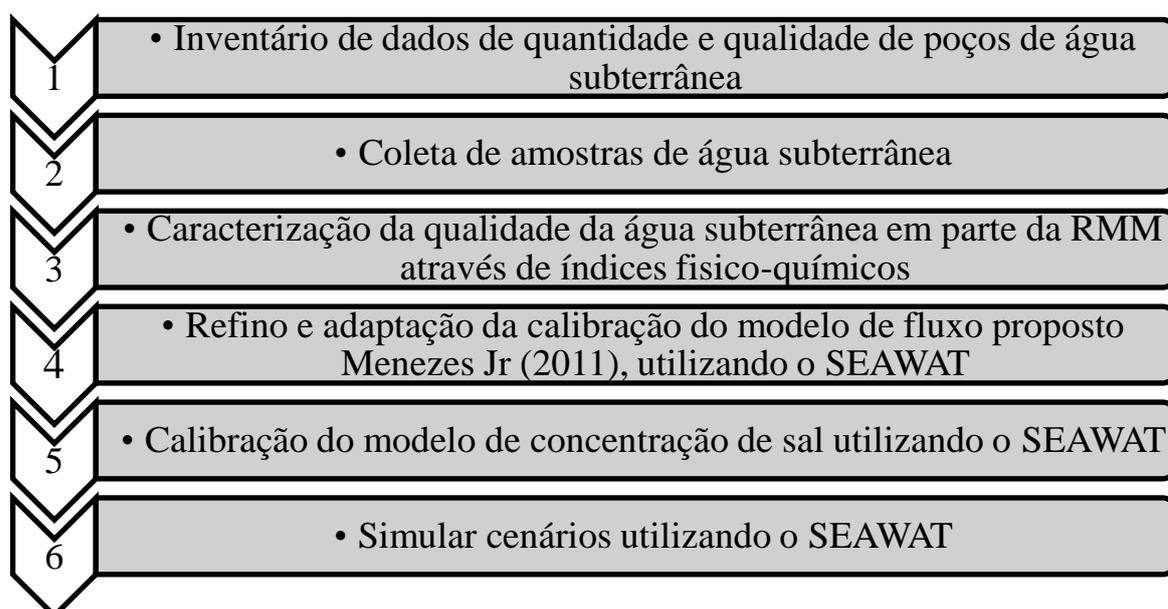
compatível com os recursos exploráveis do aquífero causando problemas de salinização;

- Explorações muito próximas ao litoral. Poços construídos sobre a zona de interface salina;
- Poços explorados com grandes vazões;
- Poços construídos com grande proximidade, o que representa uma exploração concentrada com grande vazão;
- Poços mal projetados e construídos;
- Falta de plano de exploração e prevenção da contaminação em aquíferos costeiros.

## 5 METODOLOGIA

A metodologia adotada para alcançar o objetivo geral do trabalho está resumida na Figura 7.

**Figura 7 - Etapas do Trabalho para Alcançar o Objetivo Geral**



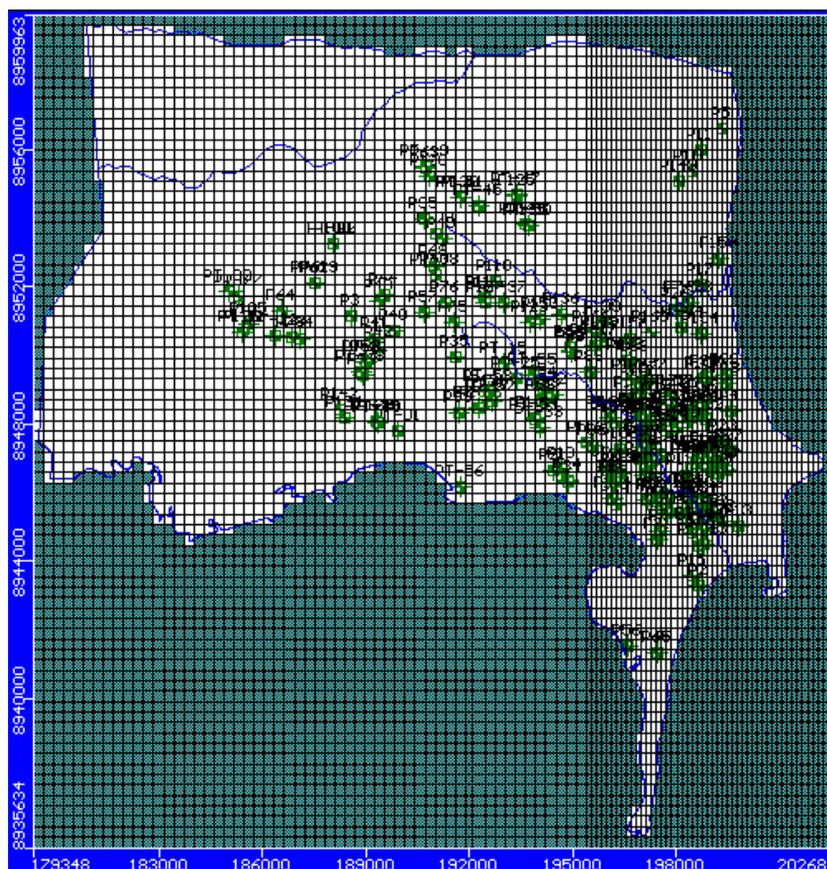
Fonte – Autor (2016)

### 5.1 Inventário dos Poços

A região de interesse possui grande quantidade de poços com finalidade de bombeamento de água subterrânea, logo é fundamental que o estudo possa contemplar a grande maioria de forma a representar melhor a realidade. O projeto ASUB possuía informação de 176 poços relativos ao nível estático da água - NE, os quais foram utilizados

por Menezes Jr (2011) para calibrar o modelo de fluxo da água subterrânea da região do domínio. Desta forma foram inventariados mais 55 dados de NE dos poços, com auxílio dos órgãos competentes pelo controle dos recursos hídricos e abastecimento de água do Estado (Figura 8).

**Figura 8 - Poços de Observação de NE**



Fonte – Autor (2016)

## 5.2 Coleta de Amostras

É certo que os modelos matemáticos/numéricos representam a realidade com uma precisão muito boa, porém a coleta de amostras e análises são de grande importância para obtenção de dados primários, os quais subsidiam a validação dos resultados gerados pelo modelo.

Além dos dados de NE, foram catalogados mais 89 poços com dados de qualidade, além destes, foram coletadas 12 amostras de água subterrânea através de poços para captação de água em alguns locais distribuídos preferencialmente na região mais próxima ao mar. O Projeto ASUB também disponibilizou dados de qualidade para 18 poços nos anos de 2009 e 2010, mês a mês.

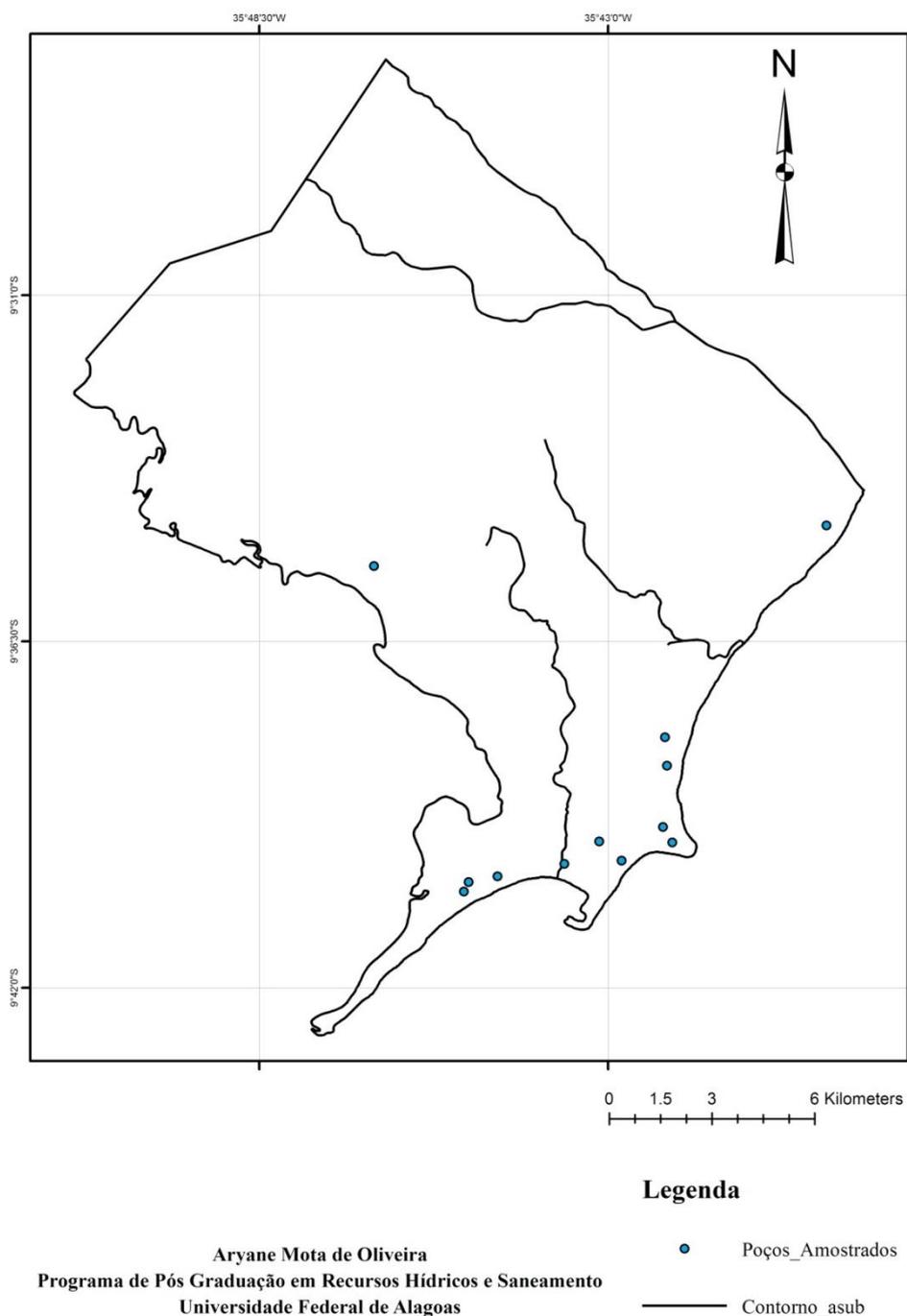
A Figura 9 mostra uma estrutura de poço ativado, o qual fez parte das coletas.

**Figura 9 - Estrutura de Poço Ativado**



Fonte – Autor (2016)

As coletas foram realizadas utilizando recipientes com capacidade para 1 L de água, estes foram lavados e ambientados para então receber a água definitiva, a qual foi conservada em gelo para em seguida ser encaminhada ao laboratório analítico, este procedimento abrangeu os seguintes bairros: Santa Amélia, Trapiche, Jaraguá, Poço, Ponta Verde, Mangabeiras, Pajuçara e Riacho Doce, como pode ser visto na Figura 10.

**Figura 10 - Localização dos Pontos de Coleta**

Fonte – Autor (2016)

Os relatórios dos poços contemplaram as seguintes análises: alcalinidade bicarbonato, alcalinidade carbonato, alcalinidade hidroxida, alcalinidade total, cálcio, cloretos, cloro livre, condutividade, dureza total, ferro total, magnésio, nitrito, nitrato, sílica, sódio, potássio, sulfato, cor, turbidez, ph e condutividade elétrica.

### 5.3 Análise da Qualidade da Água Subterrânea

A partir dos dados de qualidade, foi possível fazer comparações com os parâmetros já estabelecidos em literatura de indicadores de salinização (Tabela 1), bem como, produzir gráficos indicadores. As análises retratam as condições da água subterrânea em diversos poços, com diferentes profundidades e distribuídos na região de interesse.

**Tabela 1 – Parâmetros para Avaliação da Fonte de Contaminação da Água Subterrânea**

Indicador	Valor de Referência	Significado	Referência Bibliográfica
Sódio (mg/L)	0,1 - 10	Águas subterrâneas	Custódio e Llamas (1983)
Magnésio (mg/L)	1 - 40	Águas subterrâneas	Custódio e Llamas (1983)
Cloretos (mg/L)	< 100	Águas subterrâneas	Custódio e Llamas (1983)
$rMg^{+2}/rCa^{+2}$	> 0,9	Contato com água do mar	Hem (1985)
$rCl^-/rHCO_3^-$	0,1 - 5	Águas continentais	Custódio e Llamas (1983) Hem (1985)
Na/Cl	< 0,557	Intrusão da água do mar	Shammas e Jacks(2007)
Mg/Cl	0,05 - 0,14	Contaminação por água do mar	Olofsson (1996) Shammas e Jacks(2007)

Fonte – Autor (2016)

O símbolo  $r$  representa que o valor do íon está expresso em miliequivalente por litro (meq/L), este leva em consideração a concentração do soluto iônico em peso e a equivalência química (CUSTÓDIO e LLAMAS, 1983), sendo,

$$n^{\circ} \left( \frac{meq}{L} \right) = \frac{C}{\frac{PM}{V}} \quad (3)$$

Sendo:

$C$  = Concentração (mg/L);

$PM$  = Peso Molecular;

$V$  = Valência.

Os dados de qualidade foram separados por anos e enquadrados segundo os parâmetros da Tabela 1 e utilizando a Equação 3; a partir disso foi considerado como 100% de probabilidade de início de intrusão salina quando os valores dos sete parâmetros fossem superados em determinado poço, diminuindo para 0% os indícios de intrusão salina quando

nenhum dos valores dos parâmetros fossem superados, ou seja, não houve prevalência de importância de índice, os 100% de probabilidade foram divididos por 7, ficando cada índice com a porcentagem de influência de aproximadamente 14,29%

Ademais foi considerado na avaliação o valor de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) para verificar possíveis interferências no valor de cloreto, pois, segundo Shammas e Jacks (2007), infiltrações de fossas sépticas tem relação com o aumento nas concentrações de cloretos, sendo feita essa avaliação relacionando  $\text{NO}_3^-$  e  $\text{Cl}^-$ .

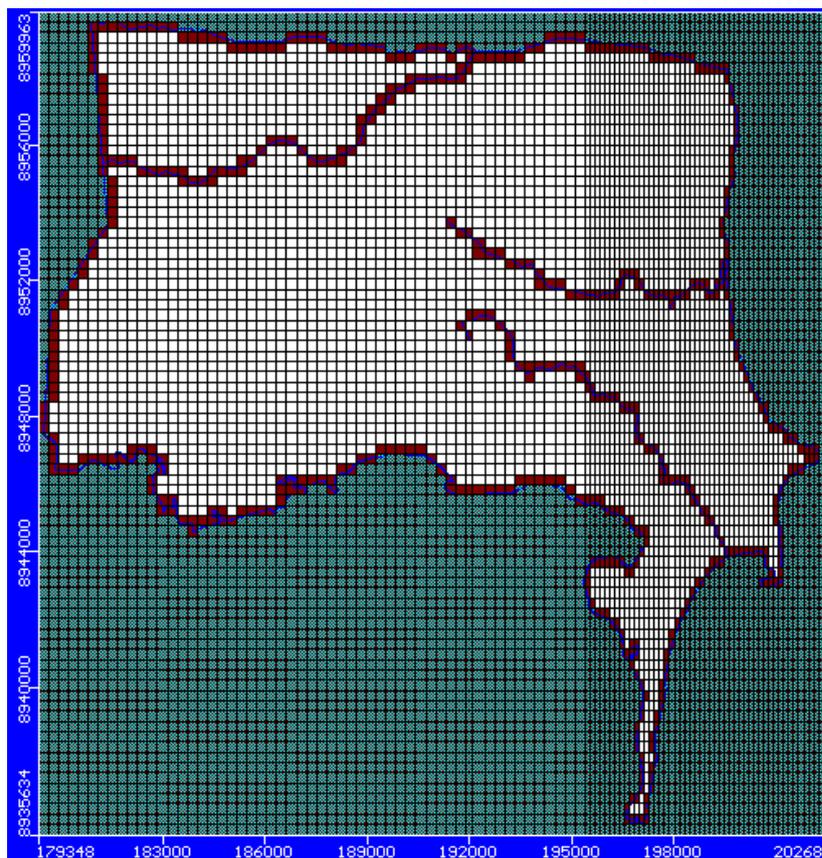
#### **5.4 Calibração do Modelo Computacional**

O objetivo da calibração consiste em preparar o modelo matemático SEAWAT para que ele possa representar o fenômeno natural o mais próximo possível da realidade. A calibração realizada por Menezes Jr. (2011), a qual representa o fluxo subterrâneo sem qualquer contaminação ou bombeamento, foi realizada na mesma área de estudo do presente trabalho; portanto foram extraídas algumas entradas deste modelo para adaptar a calibração ao atual modelo, dando ênfase a região costeira.

As condições de contorno da área de estudo são bem definidas por contornos físicos; são eles, Lagoa e Rio Mundaú, Rio Pratygy, Oceano Atlântico e uma Falha Geológica. Sendo a Lagoa e o Rio Mundaú, o Oceano Atlântico, o Rio Pratygy, o Rio Messias, o Rio Jacarecica e o Rio Reginaldo as cargas fixas, que representam o afloramento da água subterrânea na superfície.

O eixo foi rotacionado, de forma a melhorar o refinamento na região costeira do Oceano Atlântico e desta forma, também, diminuir o tempo para gerar resultados pelo SEAWAT. As cargas hidráulicas fixas foram inseridas e direcionadas ao *layer* apropriado (Figura 11).

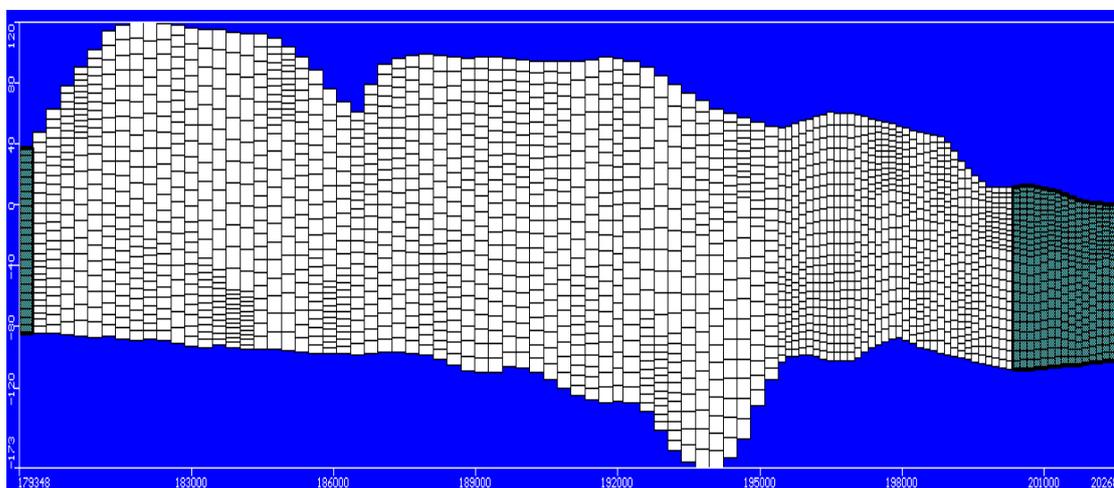
**Figura 11 – Área de Estudo com Eixo Rotacionado e Cargas Fixas**



Fonte – Autor (2016)

As topografias de superfície, formação Barreiras e formação Marituba foram exportadas do modelo de Menezes Jr. (2011) e importadas para o SEAWAT, essas duas camadas foram divididas em doze *layers* cada (Figura 12).

**Figura 12 - Perfil do Domínio**



Fonte – Autor (2016)

A princípio o domínio foi dividido em apenas quatro *layers* cada camada, porém segundo Al-Maktoum et al. (2007) quando a grade é dividida com uma proporção de 0,38 e 0,60% do total do domínio em termos de comprimento e profundidade, respectivamente, é um valor suficiente para gerar um resultado com exatidão satisfatória, desta forma o domínio foi dividido em doze *layers*, cada camada, resultando em 24 camadas em todo o domínio, assim a proporção ficou em torno de 3% da profundidade, o que possibilitou uma melhora significativa no coeficiente de correlação na calibração do fluxo subterrâneo. O tempo para convergência do modelo foi um fator que impossibilitou o refinamento maior das camadas do domínio. A inserção de novos poços de NE também teve relação direta com a melhoria da calibração do modelo de fluxo. Foram inseridos 55 poços de NE além daqueles que foram utilizados por Menezes Jr. (2011). Os poços de observação não são envolvidos no cálculo do fluxo, funcionam apenas para calibrar o modelo, o que é feito automaticamente no *software*.

Além disso, algumas variáveis para calibração do modelo de fluxo subterrâneo foram exportadas do modelo de fluxo realizado por Menezes Jr. (2011) e importadas para o SEAWAT, assim como foram realizadas algumas modificações e inserção de novas informações, foram elas:

- **Porosidade:** a porosidade depende do tamanho dos grãos, quanto mais variado o tamanho dos grãos, menor será a porosidade; A porosidade total pode ser representada pela relação entre o volume de vazios e o volume total; onde  $\eta$  representa a porosidade total,  $V_v$ , volume de vazios e  $V$  o volume total (Equação 4). A porosidade efetiva é definida como a relação entre o volume de água que foi efetivamente liberado de uma amostra de rocha porosa ou solo saturado e o volume total; onde  $\eta_e$  representa a porosidade efetiva e  $V_D$  o volume de água drenado por gravidade (Equação 5) (CUSTÓDIO E LLAMAS, 1983).

$$\eta = \frac{V_v}{V} \quad (4)$$

$$\eta_e = \frac{V_D}{V} \quad (5)$$

A porosidade efetiva foi fixada em 0.15 e a porosidade total em 0.3 para todas as camadas do modelo (MENEZES JR., 2011).

- **Condutividade Hidráulica:** considera as características do meio, incluindo porosidade, tamanho, distribuição, forma e arranjo das partículas, assim como também as características do fluido que está escoando. Este parâmetro pode ser representado pela Equação 6, onde  $K$  representa a condutividade hidráulica [L/T],  $k$ , permeabilidade intrínseca do meio poroso [L<sup>2</sup>],  $\rho$  e  $\mu$ , representam as características do fluido, massa específica e viscosidade do fluido respectivamente [L<sup>2</sup>/T] e  $g$  a aceleração da gravidade [LT<sup>2</sup>] (FEITOSA e MANOEL FILHO, 2000).

$$K = \frac{k\rho g}{\mu} \quad (6)$$

A Tabela 2 apresenta valores de condutividade hidráulica e permeabilidade intrínseca para alguns tipos de sedimentos não consolidados.

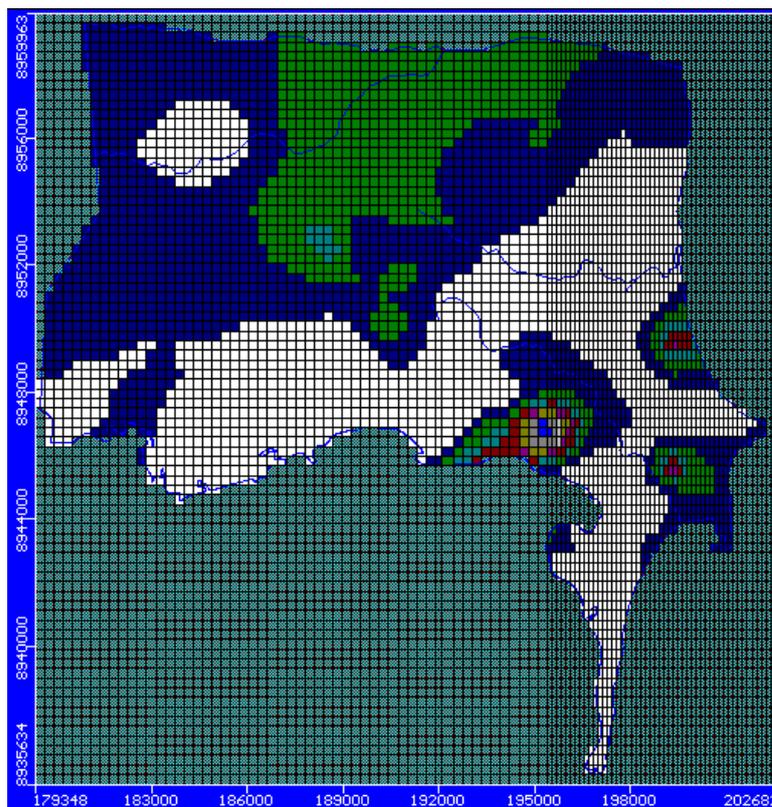
**Tabela 2 - Faixa de valores de condutividade hidráulica para vários materiais não consolidados**

Material	Condutividade Hidráulica (cm/s)
Argila	$10^{-9} - 10^{-6}$
Silte; Silte arenoso	$10^{-6} - 10^{-4}$
Areia argilosa	$10^{-6} - 10^{-4}$
Areia siltosa; Areia fina	$10^{-5} - 10^{-3}$
Areia bem distribuída	$10^{-3} - 10^{-1}$
Cascalho bem distribuído	$10^{-2} - 10^0$

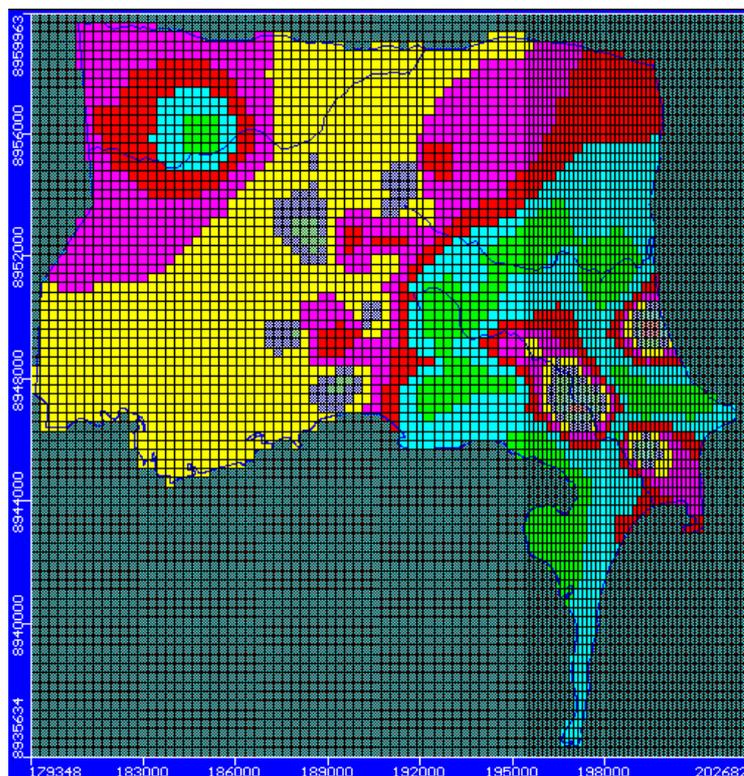
Fonte – Adaptado de Fetter (1988)

A condutividade foi exportada do modelo de Menezes Jr. (2011) e importada para o atual modelo, e os valores interpolados foram multiplicados por 10 e se mantiveram na faixa de valor adequada segundo a Tabela 2, desta forma foi possível ajustar melhor a calibração do modelo (Figuras 13 e 14), cada camada recebeu informações de condutividade diferente e o Método de interpolação utilizado foi Kriging, pois representa bem ambientes naturais.

A condutividade se manteve numa faixa de variação entre  $10^{-3}$  e  $10^{-5}$ , alguns perfis de sondagem realizados na cidade de Maceió evidenciaram a presença de areia argilosa e areia siltosa, além de outras areias de diferentes granulometrias (Marques e Marques, 2005). Desta forma, encontram-se dentro da faixa de condutividade hidráulica específica para o tipo de solo.

**Figura 13 – Condutividade Hidráulica na Formação Barreira**

Fonte – Autor (2016)

**Figura 14 - Condutividade Hidráulica na Formação Marituba**

Fonte – Autor (2016)

- **Transmissividade:** corresponde à quantidade de água que pode ser transmitida horizontalmente por toda a espessura saturada do aquífero. A transmissividade é dada pela Equação 7. Onde  $T$  representa a transmissividade [ $L^2/T$ ],  $K$ , condutividade hidráulica [ $L/T$ ] e  $b$  a espessura do aquífero [ $L$ ](FEITOSA e MANOEL FILHO, 2000).

$$T = Kb \quad (7)$$

- **Coefficiente de Armazenamento:** é o volume de água liberado por um volume do aquífero submetido a um decréscimo de carga hidráulica. É um parâmetro adimensional que pode ser definido pela Equação 8.

$$S = S_s b \quad (8)$$

Onde  $S$  representa o coeficiente de armazenamento e  $S_s$  o armazenamento específico. O armazenamento específico pode ser calculado pela Equação 9, sendo  $\alpha$  é a compressibilidade do meio poroso e  $\beta$  a compressibilidade da água.

$$S_s = \rho g(\alpha + \eta\beta) \quad (9)$$

O armazenamento específico para a formação Barreira e Marituba foi fixado em  $1.10^{-5} m^{-1}$  (MENEZES JR., 2011).

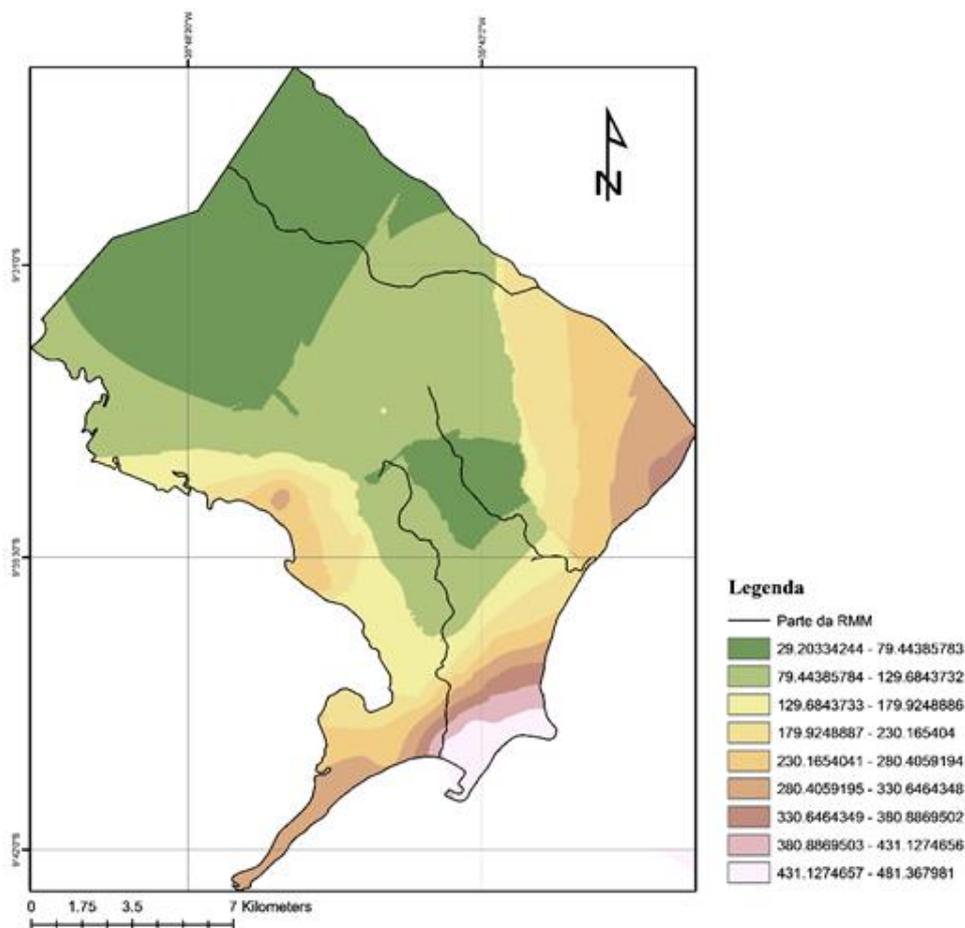
- **Recarga:** a recarga ocorre quando há infiltração de água da chuva, a qual infiltra pelo solo e atinge o lençol freático, podendo ocorrer também devido a infiltrações nas redes de saneamento e drenagem existentes. Menezes Jr. (2011) utilizou dados pluviométricos e interpolou no MODFLOW. A recarga foi caracterizada com pouca influência no modelo, de acordo com análise de sensibilidade de alguns parâmetros, nos resultados do modelo, foi utilizado um valor fixo para toda região de 300 mm/ano, valor médio dentro da interpolação anteriormente utilizada.

Esses parâmetros proporcionaram a calibração do Modelo de Fluxo utilizando o SEAWAT, a qual foi realizada através da comparação das cargas observadas e cargas calculadas pelo modelo.

Após a calibração do fluxo subterrâneo foi dado início a inserção das variáveis para calibração da concentração de salinidade no aquífero, são eles:

- **Concentração Inicial e Concentração Constante:** esses dois parâmetros permitem a inserção do valor de concentração de sal no domínio. O parâmetro de salinidade é muito próximo ao valor de concentração dos Sólidos Totais Dissolvidos (STD) (GUO e LANGEVIN, 2002; SEFELNASR e SHERIF, 2014). Alguns problemas clássicos foram desenvolvidos e demonstram a utilização do SEAWAT com diversos códigos de densidade variável, Box, Henry, Elder, entre outros; a grande similaridade entre eles está na adoção de concentração inicial da água subterrânea de 0 mg/L STD (GUO e LANGEVIN, 2002). No entanto, a água subterrânea, mesmo em seu estado natural, apresenta sais dissolvidos. Neste sentido, Sefelnasr e Sherif (2014) consideraram o contorno na costa com concentração de 35.000 mg/L STD e para a água subterrânea de 500 mg/L, porém neste trabalho a água subterrânea foi considerada com uma concentração inicial de sal variável espacialmente, de acordo com interpolação de dados observados, utilizando o *software* ArcGis (Figura 15).

Figura 15 - Interpolação de STD utilizando o ArcGis

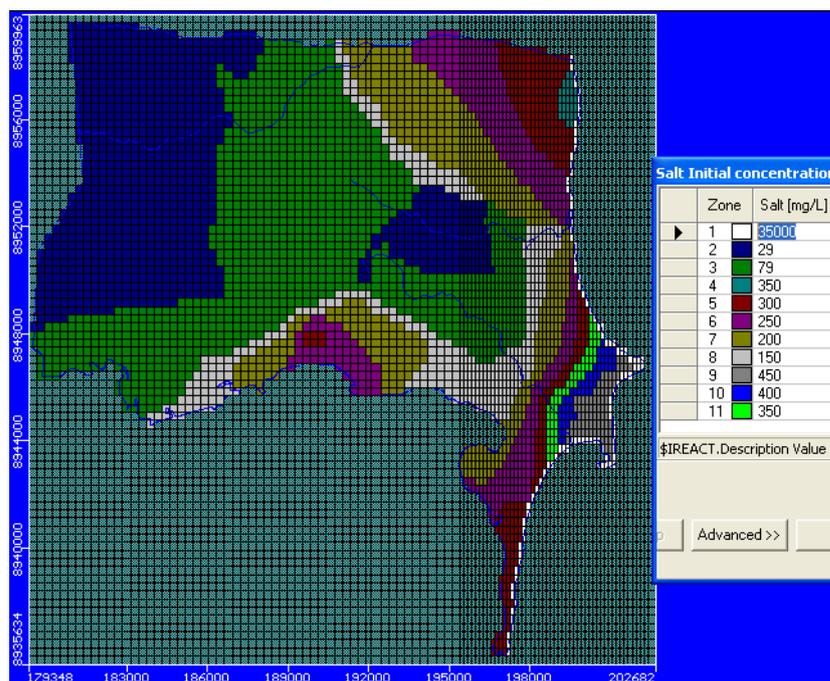


Aryane Mota de Oliveira  
Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento  
Universidade Federal de Alagoas

Fonte – Autor (2016)

A interpolação contou com dados de concentração de Sólidos Totais Dissolvidos entre dos anos de 2014 e 2015, para isso os valores de Condutividade Elétrica foram convertidos, pois segundo revisão literária realizada por Hem (1985) os fatores de conversão estão entre 0,54 – 0,96, porém para McNeil e Cox (2000) a maioria dos estudos de caso a conversão resultou em uma faixa de 0,55 a 0,75. Cobaner et al. (2012) utilizou o valor de 0.64 como conversor, por considerar um valor médio dentre esses citados, o mesmo foi feito para o presente trabalho. A união dos dados de vazões outorgadas e a concentração inicial trouxe o modelo para o ano de 2015. Manualmente, foram inseridas as regiões com os valores de STD para o domínio e o valor de 35.000 mg/L STD para a linha da costa, para a variável de concentração inicial (Figura 16).

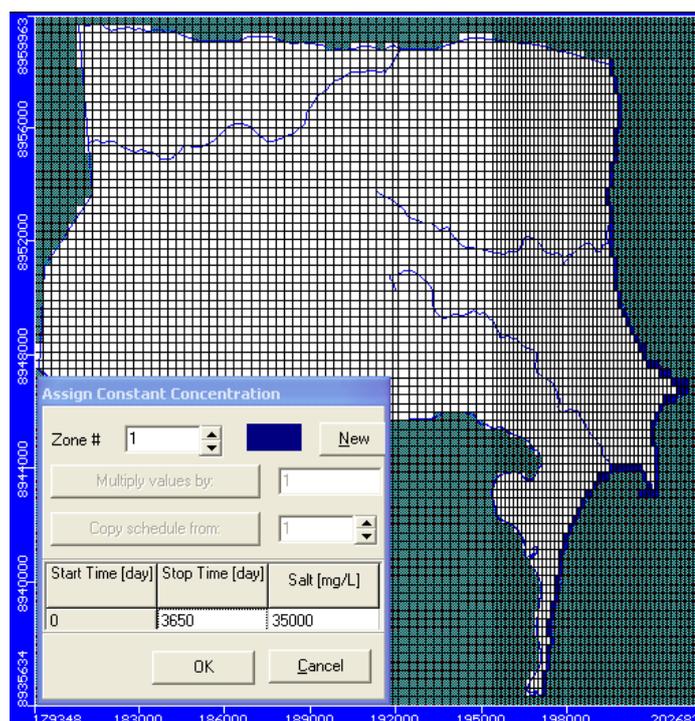
**Figura 16 – Área de Estudo com Concentração Inicial**



Fonte – Autor (2016)

A variável de concentração constante representa a fonte de contaminação do aquífero, portanto foi definida apenas na linha costa do Oceano Atlântico, Figura 17.

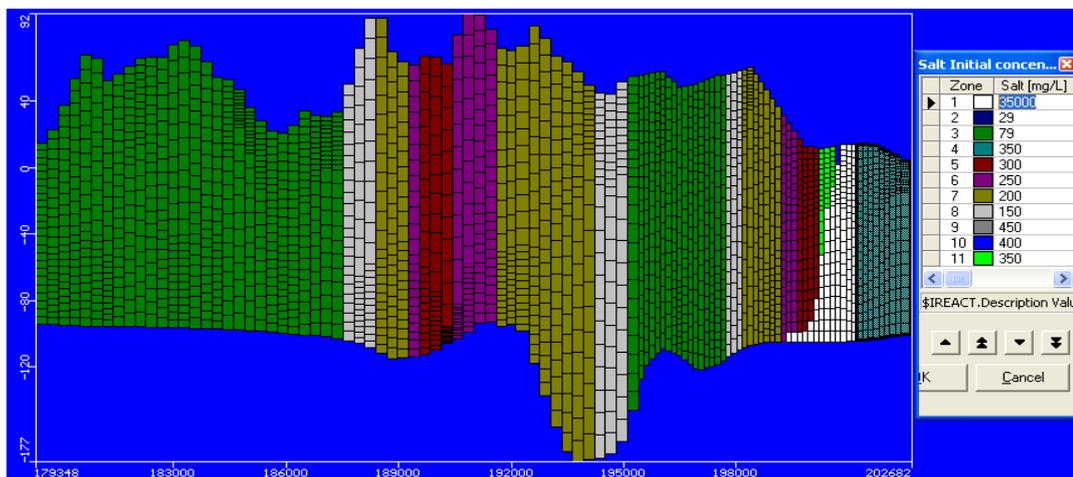
**Figura 17 - Área de Estudo com Concentração Constante**



Fonte – Autor (2016)

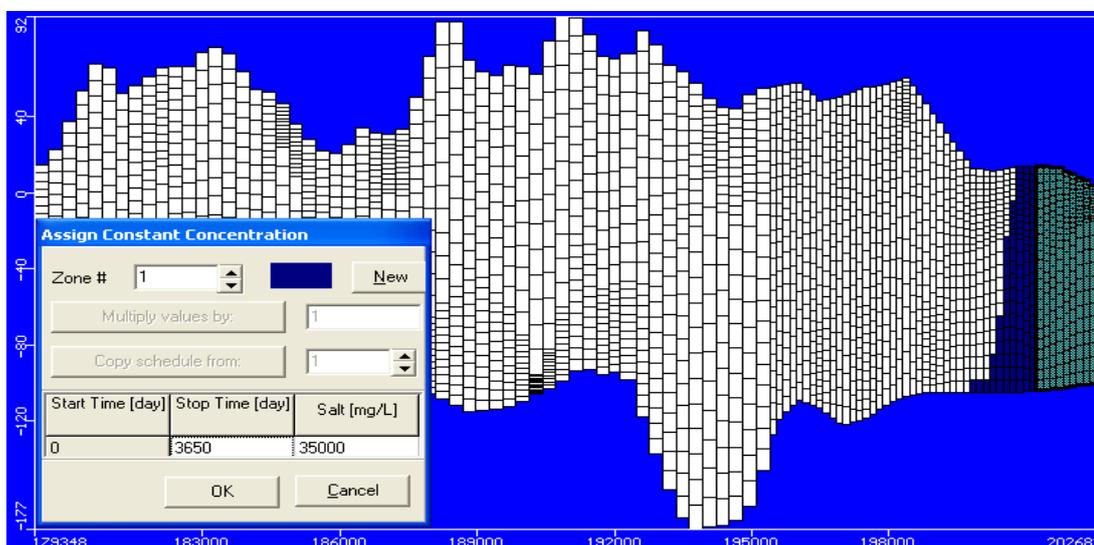
As Figuras 16 e 17 tratam do primeiro *layer* do modelo, para os demais a concentração da água do mar foi gradativamente posta adentrando a costa, pois na realidade o perfil do continente não é verticalmente reto, ver Figuras 18 e 19.

**Figura 18 - Perfil do Modelo com Concentração Inicial**



Fonte – Autor (2016)

**Figura 19 - Perfil do Modelo com Concentração Constante**



Fonte – Autor (2016)

- **Poços de Bombeamento:** para realizar a calibração do modelo para a concentração foram inseridos poços de bombeamento, perfurados desde 1979 até 2015, totalizando 342 unidades, neste caso, foram considerados apenas os poços com vazão outorgada. É certo que essa quantidade de poços não é exatamente a quantia de poços perfurados, porém foi a quantidade com dados disponíveis para esse período, pois além das falhas

existentes nos próprios dados oficiais ainda existem perfurações de poços clandestinos, assim como pode ter ocorrido a desativação de algum poço.

- **Poços de Observação de Concentração:** os valores de Condutividade Elétrica foram convertidos em STD e inseridos no modelo (Cobaner et al., 2012). Para tanto, foram consideradas as análises realizadas nos anos de 2014 e 2015. Os poços de observação não influenciam nas resoluções das equações do modelo, apenas funcionam para calibrar o mesmo, o que é realizado pelo próprio *software*.

## 5.5 Simulação de Cenários

Uma vantagem dos programas computacionais é que eles permitem ao usuário simular diversos cenários e perceber as mudanças que podem ocorrer no sistema. Para este trabalho foram simulados dois cenários:

- **Cenário 1 – Perceber o avanço da cunha salina após 10 anos com atual exploração:** utilizando apenas os poços outorgados até o ano de 2015, foi verificada a influência da exploração no avanço da cunha salina após 10 anos, ou seja, para o ano de 2025, considerando que não houvesse mais perfuração de poços.
- **Cenário 2 – Acréscimo de futuros poços:** este cenário foi estabelecido para a inserção de poços de bombeamento além daqueles outorgados até 2015 e verificada a intrusão salina para o ano de 2025. Portanto foram inseridas como poços as vazões de licença de obra hídrica, que são vazões licenciadas para realização de obra do qual demandará a exploração de água, totalizando 100 unidades. Além disso, foram inseridos 36 poços na região do litoral norte do domínio para verificar a influência da exploração da água subterrânea no avanço da cunha salina e possível formação de cones salinos (Tabelas 3 e 4).

**Tabela 3 – Vazões de Licença Hídrica e Hipotéticas que foram Adicionadas ao Cenário II**

ID	Coordenadas		Vazão (m³/s)	ID	Coordenadas		Vazão (m³/s)
	Latitude	Longitude			Latitude	Longitude	
PW1	-9.56176	-35.758547	0.0006	PW35	-9.60072	-35.721782	0.0061
PW2	-9.663393	-35.710803	0.0003	PW36	-9.602755	-35.721489	0.0022
PW3	-9.665726	-35.711614	0.0003	PW37	-9.60913	-35.695475	0.0017
PW4	-9.542936	-35.767024	0.0116	PW38	-9.612299	-35.726946	0.0028
PW5	-9.553012	-35.744013	0.0250	PW39	-9.630726	-35.698687	0.0006
PW6	-9.550004	-35.743988	0.0250	PW40	-9.642619	-35.747529	0.0139
PW7	-9.640198	-35.747464	0.0500	PW41	-9.630428	-35.698685	0.0006
PW8	-9.632438	-35.751908	0.0500	PW42	-9.475845	-37.54881	0.0008
PW9	-9.620107	-35.723239	0.0061	PW43	-9.494156	-35.80801	0.0008
PW10	-9.636109	-35.740257	0.0014	PW44	-9.544182	-35.822308	0.0131
PW11	-9.598917	-35.73962	0.0100	PW45	-9.544182	-35.822308	0.0131
PW12	-9.679579	-35.762398	0.0167	PW46	-9.627132	-35.707672	0.0083
PW13	-9.632705	-35.746775	0.0139	PW47	-9.579344	-35.734311	0.0011
PW14	-9.636163	-35.748242	0.0278	PW48	-9.579369	-35.733492	0.0028
PW15	-9.581223	-35.761662	0.0028	PW49	-9.608398	-35.740388	0.0011
PW16	-9.537798	-35.776976	0.0064	PW50	-9.579856	-35.735844	0.0028
PW17	-9.53876	-35.778695	0.0064	PW51	-9.552386	-35.784157	0.0014
PW18	-9.537005	-35.775522	0.0064	PW52	-9.594441	-35.730909	0.0056
PW19	-9.53616	-35.773932	0.0064	PW53	-9.602799	-35.681241	0.0010
PW20	-9.539202	-35.775331	0.0064	PW54	-9.653691	-35.70477	0.0005
PW21	-9.537458	-35.793501	0.0014	PW55	-9.531768	-35.792063	0.0025
PW22	-9.625175	-35.744976	0.0220	PW56	-9.595538	-35.732793	0.0037
PW23	-9.63698	-35.705456	0.0220	PW57	-9.631973	-35.737674	0.0014
PW24	-9.639531	-35.707343	0.0292	PW58	-9.656283	-35.702606	0.0013
PW25	-9.584491	-35.764347	0.0024	PW59	-9.656283	-35.702606	0.0013
PW26	-9.567899	-35.761409	0.0008	PW60	-9.657299	-35.710135	0.0004
PW27	-9.562907	-35.747169	0.0367	PW61	-9.565922	-35.774846	0.0028
PW28	-9.570746	-35.772646	0.0314	PW62	-9.564014	-35.761459	0.0025
PW29	-9.56305	-35.788185	0.0028	PW63	-9.649691	-35.715938	0.0063
PW30	-9.561648	-35.7873	0.0028	PW64	-9.670699	-35.715797	0.0006
PW31	-9.58855	-35.766264	0.0025	PW65	-9.522788	-35.802237	0.0003
PW32	-9.618673	-35.745797	0.0103	PW66	-9.559312	-35.772171	0.0053
PW33	-9.579193	-35.667901	0.0069	PW67	-9.577401	-35.780956	0.0014
PW34	-9.602078	-35.721456	0.0036	PW68	-9.656067	-35.733425	0.0011

Fonte – Autor (2016)

**Tabela 4 - Vazões de Licença Hídrica e Hipotéticas que foram Adicionadas ao Cenário II**

ID	Coordenadas		Vazão (m <sup>3</sup> /s)	ID	Coordenadas		Vazão (m <sup>3</sup> /s)
	Latitude	Longitude			Latitude	Longitude	
PW69	-9.655873	-35.699689	0.0008	PW103	-9.624844	-35.699593	0.0069
PW70	-9.547989	-35.755377	0.0028	PW104	-9.624126	-35.704073	0.0046
PW71	-9.497154	-35.813823	0.0011	PW105	-9.622589	-35.708295	0.0035
PW72	-9.499425	-35.812267	0.0025	PW106	-9.627117	-35.704152	0.0053
PW73	-9.580078	-35.769336	0.0028	PW107	-9.625669	-35.707743	0.0058
PW74	-9.534888	-35.814241	0.0026	PW108	-9.625488	-35.712464	0.0075
PW75	-9.617576	-35.719923	0.0015	PW109	-9.625042	-35.695676	0.0023
PW76	-9.496932	-35.813411	0.0011	PW110	-9.622444	-35.694752	0.0023
PW77	-9.568621	-35.764946	0.0022	PW111	-9.620668	-35.693596	0.0012
PW78	-9.568621	-35.764946	0.0022	PW112	-9.604294	-35.723469	0.0023
PW79	-9.545445	-35.744607	0.0018	PW113	-9.610667	-35.713472	0.0069
PW80	-9.617604	-35.740399	0.0013	PW114	-9.616021	-35.711073	0.0035
PW81	-9.559132	-35.770895	0.0026	PW115	-9.618694	-35.693847	0.0023
PW82	-9.635371	-35.749	1.1500	PW116	-9.609979	-35.68743	0.0046
PW83	-9.592181	-35.727704	0.0717	PW117	-9.600302	-35.680597	0.0029
PW84	-9.609444	-35.69931	0.1667	PW118	-9.625699	-35.695599	0.0046
PW85	-9.609481	-35.699147	0.1667	PW119	-9.630316	-35.699758	0.0069
PW86	-9.5489	-35.739574	0.0833	PW120	-9.624724	-35.697355	0.0035
PW87	-9.547226	-35.81345	0.6667	PW121	-9.622149	-35.694038	0.0035
PW88	-9.537789	-35.799466	0.3333	PW122	-9.620982	-35.69306	0.0046
PW89	-9.581326	-35.671395	0.3333	PW123	-9.619926	-35.692558	0.0058
PW90	-9.542828	-35.790742	0.0417	PW124	-9.616798	-35.69388	0.0035
PW91	-9.602116	-35.681873	0.0667	PW125	-9.607184	-35.684027	0.0023
PW92	-9.642384	-35.712283	0.1667	PW126	-9.601034	-35.680752	0.0035
PW93	-9.539618	-35.814635	0.6667	PW127	-9.601292	-35.678894	0.0023
PW94	-9.566531	-35.783344	0.0733	PW128	-9.59938	-35.677782	0.0017
PW95	-9.609163	-35.690168	0.3333	PW129	-9.596215	-35.675534	0.0023
PW96	-9.557185	-35.755561	0.2500	PW130	-9.59504	-35.67368	0.0035
PW97	-9.577611	-35.766002	0.0400	PW131	-9.593297	-35.675554	0.0035
PW98	-9.537069	-35.817035	0.3333	PW132	-9.591428	-35.673706	0.0017
PW99	-9.534047	-35.816482	0.3333	PW133	-9.587068	-35.669152	0.0035
PW100	-9.610873	-35.73927	0.0833	PW134	-9.584819	-35.666204	0.0023
PW101	-9.627422	-35.699273	0.0035	PW135	-9.579419	-35.657455	0.0012
PW102	-9.625485	-35.697631	0.0010	PW136	-9.58291	-35.662561	0.0029

Fonte – Autor (2016)

## **6 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **6.1 Caracterização da Qualidade da Água Subterrânea**

A obtenção de dados primários para a caracterização de qualquer ambiente é a melhor forma de obter resultados que coincidam com a realidade, apesar das diversas dificuldades embutidas, além dos erros de precisão, seja por conta do equipamento, método ou manuseio do usuário.

Em relação aos dados de qualidade da água dos poços fornecidos pelos órgãos competentes, poucos foram os dados antigos encontrados e a maioria não eram dados consistentes, portanto foram separados nos anos de 2012, 2013 e 2014, também não há uma sequência de coleta e análise da água por anos consecutivos do mesmo poço (Tabelas 5, 6 e 7). Esses dados inventariados estão com localização mais distante da linha do mar, portanto foram realizadas coletas no ano de 2015, especialmente na região próxima ao Oceano Atlântico (Tabela 8).

**Tabela 5 - Inventário de Dados do Ano de 2012**

ID	Coordenadas		EC ( $\mu\text{S/cm}$ )	STD (mg/L)	$\text{Cl}^-$ (mg/L)	$\text{NO}_3^-$ (mg/L)	$\text{K}^+$ (mg/L)	$\text{SO}_4^{2-}$ (mg/L)	$\text{Na}^+$ (mg/L)	$\text{Ca}^{2+}$ (mg/L)	$\text{Mg}^{2+}$ (mg/L)	$\text{HCO}_3^-$ (mg/L)
	Latitude	Longitude										
P1	-9.575708	-35.737805	75.4	48.256	27.0	14.30	-	0.00	26.0	16.0	6.0	16.0
P2	-9.575715	-35.742648	130.6	83.584	22.0	11.30	2.0	0.00	22.0	10.0	20.0	14.0
P3	-9.652013	-35.737135	71.5	45.76	40.0	3.54	4.0	16.80	25.0	20.0	12.0	14.0
P4	-9.65308	-35.739329	632	404.48	212.0	4.85	10.0	42.60	155.0	68.0	62.0	14
P5	-9.646947	-35.737996	123	78.72	41.0	5.51	4.0	3.00	31.0	22.0	10.0	20.0
P6	-9.646816	-35.737476	311	199.04	73.0	12.40	2.0	1.00	73.0	22.0	20.0	16.0
P7	-9.635845	-35.719515	178	113.92	51.0	20.10	2.0	0.10	67.0	10.0	28.0	8.0
P8	-9.539417	-35.81002	83.4	53.376	25.0	18.90	1.0	2.50	33.0	12.0	14.0	16.0
P9	-9.538186	-35.810264	71.9	46.016	21.0	15.00	1.0	0.00	23.0	10.0	18.0	12.0
P10	-9.533161	-35.803816	45.2	28.928	10.0	4.32	1.0	0.00	5.0	10.0	8.0	14.0
P11	-9.532195	-35.80369	38.4	24.576	12.0	4.28	1.0	0.30	6.0	10.0	10.0	12.0
P12	-9.532194	-35.803817	31.2	19.968	13.0	3.09	1.0	0.00	5.0	6.0	16.0	10.0
P13	-9.56294	-35.747179	338	216.32	39.0	11.00	2.0	0.00	45.0	14.0	12.0	16.0

Fonte – Autor (2016)

**Tabela 6 - Dados Inventariados do Ano de 2013**

ID	Coordenadas		EC ( $\mu\text{S/cm}$ )	STD (mg/L)	$\text{Cl}^-$ (mg/L)	$\text{NO}_3^-$ (mg/L)	$\text{K}^+$ (mg/L)	$\text{SO}_4^{2-}$ (mg/L)	$\text{Na}^+$ (mg/L)	$\text{Ca}^{2+}$ (mg/L)	$\text{Mg}^{2+}$ (mg/L)	$\text{HCO}_3^-$ (mg/L)
	Latitude	Longitude										
P14	-9.617897	-35.718952	136.5	87.36	33.0	6.29	0.0	0.80	13.9	6.0	12.0	8.0
P15	-9.567309	-35.750718	183.9	117.696	51.0	19.20	2.0	0.00	30.0	18.0	16.0	10.0
P16	-9.588727	-35.775306	139.8	89.472	43.0	12.00	2.0	0.00	25.0	14.0	14.0	14.0
P17	-9.577272	-35.777452	167.8	107.392	88.0	19.40	2.0	0.00	25.0	18.0	40.0	22.0
P18	-9.56555	-35.745006	96.5	61.76	56.0	8.17	0.0	0.10	16.0	8.0	12.0	16.0
P19	-9.578608	-35.786806	128.7	82.368	34.0	11.00	1.0	0.80	18.0	10.0	18.0	16.0
P20	-9.562425	-35.750615	1156.5	740.16	26.0	4.01	2.0	6.40	15.0	50.0	58.0	22.0
P21	-9.573041	-35.756281	138.8	88.832	32.0	13.70	1.0	0.00	22.0	10.0	26.0	8.0

Fonte – Autor (2016)

Tabela 7 - Dados Inventariados do Ano de 2014

ID	Coordenadas		EC ( $\mu$ S/cm)	STD (mg/L)	$Cl^-$ (mg/L)	$NO_3^-$ (mg/L)	$K^+$ (mg/L)	$SO_4^{2-}$ (mg/L)	$Na^+$ (mg/L)	$Ca^{2+}$ (mg/L)	$Mg^{2+}$ (mg/L)	$HCO_3^-$ (mg/L)
	Latitude	Longitude										
P22	-9.605257	-35.737241	223	142.72	22.0	5.01	0.0	0.80	-	8.0	8.0	10.0
P23	-9.615491	-35.748858	306	195.84	48.0	12.00	1.0	0.30	29.0	10.0	18.0	10.0
P24	-9.61174	-35.744513	108.9	69.696	21.0	4.33	1.0	0.30	24.0	0.0	10.0	8.0
P25	-9.61174	-35.744513	124.5	79.68	34.0	4.63	0.0	0.10	11.0	8.0	6.0	10.0
P26	-9.614979	-35.749655	336	215.04	78.0	6.41	2.0	0.20	81.0	12.0	18.0	10.0
P27	-9.614979	-35.749655	312	199.68	73.0	6.59	1.0	0.40	33.0	10.0	12.0	10.0
P28	-9.588727	-35.775306	279	178.56	33.0	11.70	3.0	1.60	56.0	4.0	20.0	8.0
P29	-9.652271	-35.729735	433	277.12	63.0	16.40	0.0	13.40	-	32.0	34.0	28.0
P30	-9.64396	-35.720481	440	281.6	103.0	32.80	4.0	10.90	18.0	12.0	64.0	4.0
P31	-9.633305	-35.720842	227	145.28	44.0	8.07	0.0	1.50	11.0	0.0	14.0	2.0
P32	-9.636562	-35.73285	519	332.16	79.0	27.10	1.0	5.80	20.0	18.0	64.0	24.0
P33	-9.64086	-35.725091	298	190.72	55.0	10.60	1.0	6.20	15.0	2.0	24.0	26.0
P34	-9.635845	-35.719515	254	162.56	58.0	18.50	2.0	1.10	84.0	10.0	26.0	4.0
P35	-9.64396	-35.720481	632	404.48	102.0	146.50	10.0	10.80	112.0	18.0	58.0	4.0
P36	-9.639813	-35.709003	525	336	122.0	38.00	10.0	24.20	152.0	26.0	70.0	10.0
P37	-9.636262	-35.711251	338	216.32	47.0	9.88	8.0	13.20	58.0	66.0	82.0	138.0
P38	-9.633296	-35.71395	440	281.6	45.0	2.39	4.0	23.80	45.0	54.0	198.0	238.0
P39	-9.631264	-35.727499	165	105.6	52.0	6.83	1.0	2.40	48.0	10.0	16.0	8.0
P40	-9.610156	-35.746102	172.8	110.592	25.0	6.33	1.0	0.00	29.0	10.0	8.0	10.0
P41	-9.60849	-35.746553	201	128.64	26.0	8.20	1.0	0.00	37.0	10.0	18.0	14.0

P42	-9.609302	-35.746669	140.1	89.664	22.0	5.23	1.0	0.00	26.0	8.0	12.0	10.0
P43	-9.619581	-35.725366	143	91.52	22.0	2.65	0.0	2.20	-	0.0	10.0	6.0
P44	-9.577153	-35.777669	172	110.08	29.0	2.96	0.0	0.80	-	6.0	8.0	8.0
P45	-9.577272	-35.777452	265	169.6	38.0	6.55	0.0	0.90	-	8.0	12.0	6.0
P46	-9.618705	-35.745807	142	90.88	24.0	3.73	2.0	0.10	22.0	8.0	12.0	10.0
P47	-9.618705	-35.745807	113.6	72.704	28.0	3.81	0.0	0.10	13.0	4.0	10.0	12.0
P48	-9.57857	-35.786811	143.8	92.032	16.0	8.66	1.0	0.10	31.0	2.0	12.0	6.0
P49	-9.578608	-35.786806	172.7	110.528	24.0	11.00	2.0	0.30	38.0	2.0	18.0	6.0
P50	-9.607769	-35.723387	183	117.12	36.0	2.05	2.0	0.00	-	10.0	30.0	12.0
P51	-9.577153	-35.777669	352	225.28	35.0	18.90	2.0	0.50	38.0	10.0	36.0	14.0
P52	-9.610717	-35.729975	265	169.6	38.0	6.55	0.0	0.90	-	8.0	12.0	6.0
P53	-9.629882	-35.724083	133	85.12	38.0	8.37	1.0	2.90	41.0	6.0	8.0	8.0
P54	-9.570778	-35.772656	163.3	104.512	24.0	8.00	7.0	3.00	22.0	4.0	12.0	6.0
P55	-9.570262	-35.764915	88.7	56.768	16.0	3.47	0.0	3.50	18.0	0.0	8.0	8.0
P56	-9.577855	-35.771176	145.8	93.312	27.0	6.36	3.0	2.20	78.0	4.0	12.0	6.0
P57	-9.573911	-35.765903	138.1	88.384	22.0	7.33	1.0	1.00	35.0	2.0	8.0	10.0
P58	-9.565353	-35.742528	158.1	101.184	25.0	10.70	1.0	0.00	92.0	4.0	14.0	8.0

Fonte – Autor (2016)

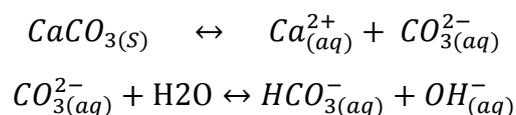
**Tabela 8 - Dados Amostrados no Ano de 2015**

ID	Coordenadas		EC ( $\mu\text{S/cm}$ )	STD (mg/L)	$\text{Cl}^-$ (mg/L)	$\text{NO}_3^-$ (mg/L)	$\text{K}^+$ (mg/L)	$\text{SO}_4^{2-}$ (mg/L)	$\text{Na}^+$ (mg/L)	$\text{Ca}^{2+}$ (mg/L)	$\text{Mg}^{2+}$ (mg/L)	$\text{HCO}_3^-$ (mg/L)
	Latitude	Longitude										
P59	-9.661558	-35.699810	815	521.6	155.2	1	9.1	17.48	1	56.121	62.69	338
P60	-9.674540	-35.754570	502	321.28	130.86	35.7	5.5	21.59	35.7	45.61	12.15	86
P61	-9.588361	-35.778143	810	518.4	47.69	8.9	2.7	12.13	8.9	7.33	14.58	1
P62	-9.670539	-35.745699	244	156.16	72.02	8.7	7.8	31.47	8.7	38.28	17.01	80
P63	-9.667255	-35.728179	860	550.4	186.65	12	11.8	15.01	12	127.86	10.21	250
P64	-9.577647	-35.659268	277	177.28	65.94	10.3	1	12.95	10.3	14.66	14.58	30
P65	-9.661294	-35.718975	815	521.6	165.35	4.6	8.1	12.95	4.6	131.12	23.33	358
P66	-9.633692	-35.701716	353	225.92	87.24	23.9	14.1	11.88	20	43.98	17.01	68
P67	-9.641253	-35.701158	524	335.36	101.44	20	7.5	39.42	21	87.96	22.84	174
P68	-9.666342	-35.713104	575	368	90.28	21	11.2	9.07	23	144.15	16.04	284
P69	-9.672058	-35.753313	510	326.4	116.66	23	9.6	10.01	18	84.7	15.55	144
P70	-9.578637	-35.659194	842	538.88	262.73	2.53	2.2	0.01	172.7	7.33	5.83	78

Fonte – Autor (2016)

s dados apresentados mostraram que há uma predominância de compostos na ordem de  $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$  para os cátions e para os ânions de  $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$ , nos dados de 2012 a 2014, mesmo comportamento observado por Chandrajith et al. (2013) e Singaraja et al. (2014). Para o ano de 2015 houve uma inversão nessas ordens de predominância, sendo  $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$  para os cátions e  $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$ . Segundo ANA (2011b), quando há predominância do bicarbonato sobre o sulfato e cloreto, significa que a água não é de circulação regional com longos tempos de residência, pois a ordem normal de predominância para água de circulação regional é de  $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$ .

É importante salientar que rochas calcárias são fontes do íon carbonato, pois são constituídas predominantemente de  $\text{CaCO}_3$ , que apesar de ser quase insolúvel, pequena quantidade se dissolve em contato com água, desta forma, esse íon atua como base e produz íons bicarbonato e hidroxila (ANA, 2011b):

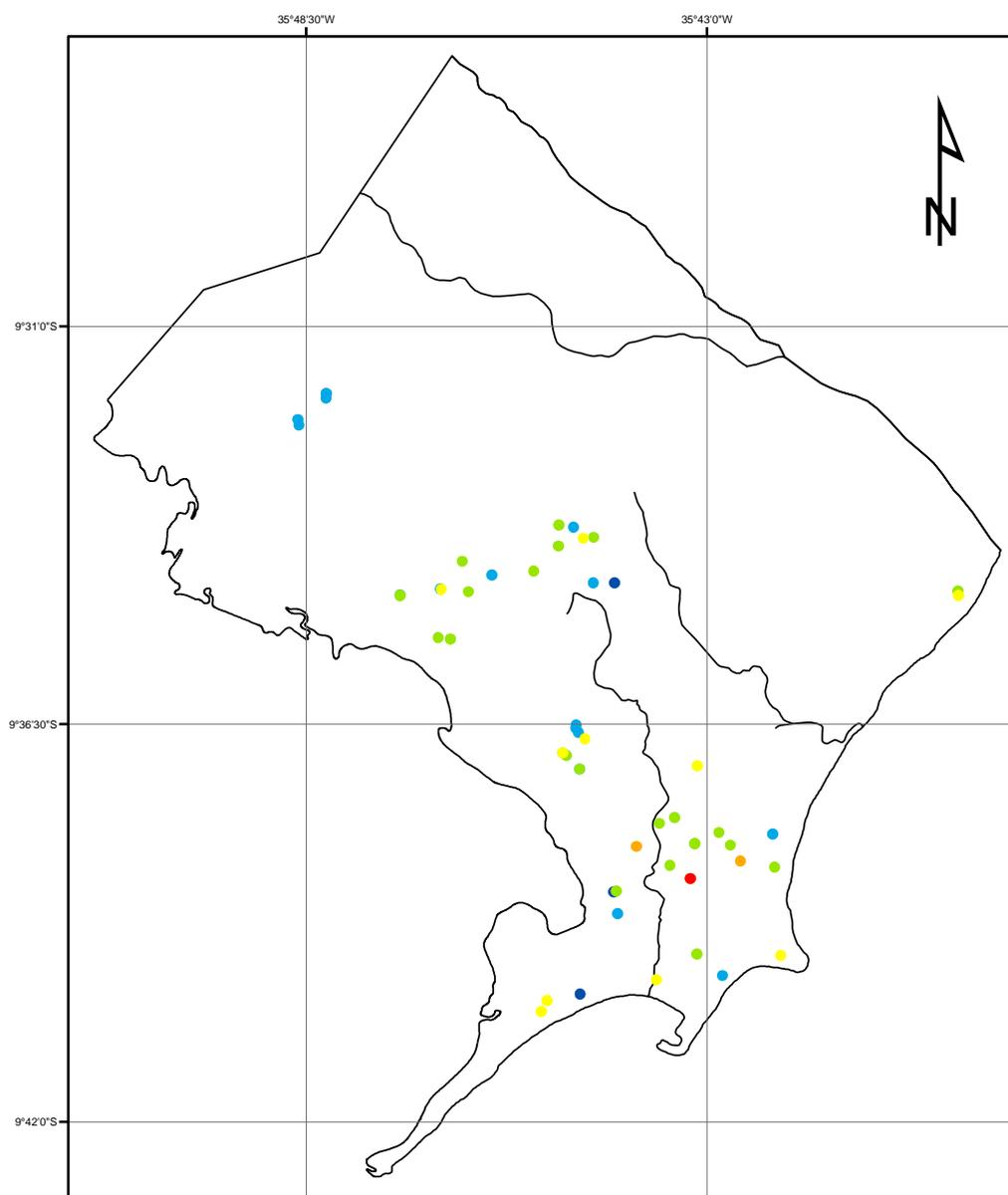


E através do perfil geológico sintetizado por Marques (2004) da cidade de Maceió, pode-se perceber a presença de calcário na formação geológica, principalmente na região da linha do mar até uma profundidade de aproximadamente 1300 m. O que pode influenciar nas concentrações de  $\text{HCO}_3^-$ .

A partir dos resultados físico-químicos foi possível realizar comparações com os parâmetros estabelecidos em literatura e indicar a probabilidade de ter ocorrido contaminação por intrusão salina, gerando o mapa da Figura 20. Para esta avaliação foram considerados os parâmetros de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $r\text{Mg}^{2+}/r\text{Ca}^{2+}$ ,  $r\text{Cl}^-/r\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Na}/\text{Cl}$ .

Além disso, no geral, os parâmetros que mais foram superados para os poços foram  $\text{Na}^+$  e  $r\text{Mg}^{2+}/r\text{Ca}^{2+}$ , porém na região costeira além desses índices outros que se destacaram foram os de  $\text{Cl}^-$  e  $\text{Na}/\text{Cl}$ .

**Figura 20 - Indicativo de Intrusão Salina**



**Legenda**

- 85 a 90%
- 71 a 85%
- 57 a 71%
- 42 a 57%
- 28 a 42%
- 14 a 28%
- Parte da RMM

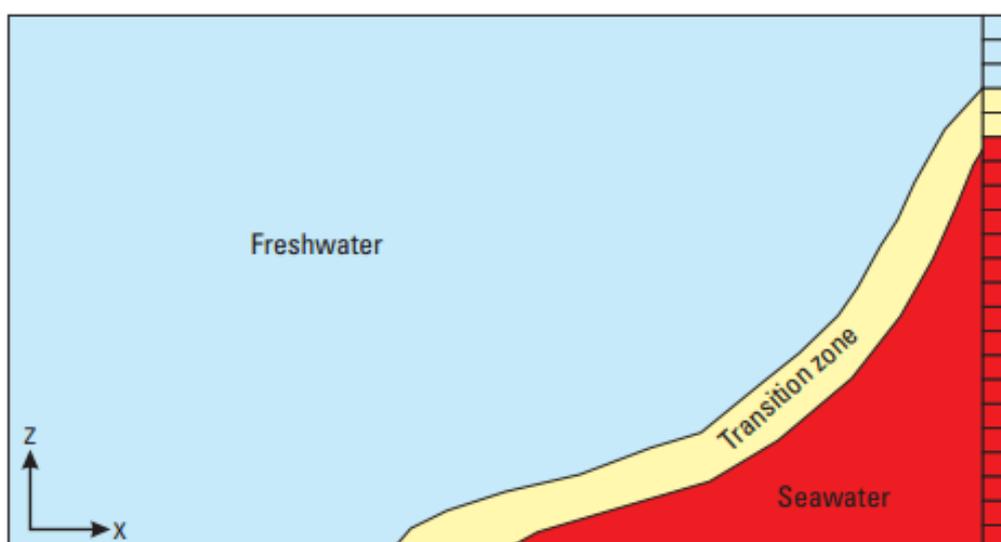
Aryane Mota de Oliveira  
 Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento  
 Universidade Federal de Alagoas

Fonte – Autor (2016)

Os poços em vermelho são aqueles com probabilidade acima de 85% de apresentar salinidade devido água do mar. Os poços em laranja possuem uma probabilidade que varia entre 71 e 85% de apresentar salinidade advinda da intrusão salina. Os poços em cor verde possuem de 42 a 57% de chance de apresentar intrusão

salina, contudo, ainda existem poços próximos ao mar que estão em azul, que representa abaixo de 42% de chance de intrusão salina, isso pode ter ocorrido dada a profundidade do poço, poços rasos que são perfurados nas proximidades da costa marítima possuem menor probabilidade de sofrer salinização do que os poços profundos na mesma região; como pode ser observado na Figura 21, a lâmina de água doce no aquífero diminui ao passo que se aproxima da água do mar.

**Figura 21 - Modelo de Interação entre Aquífero e Água do Mar**

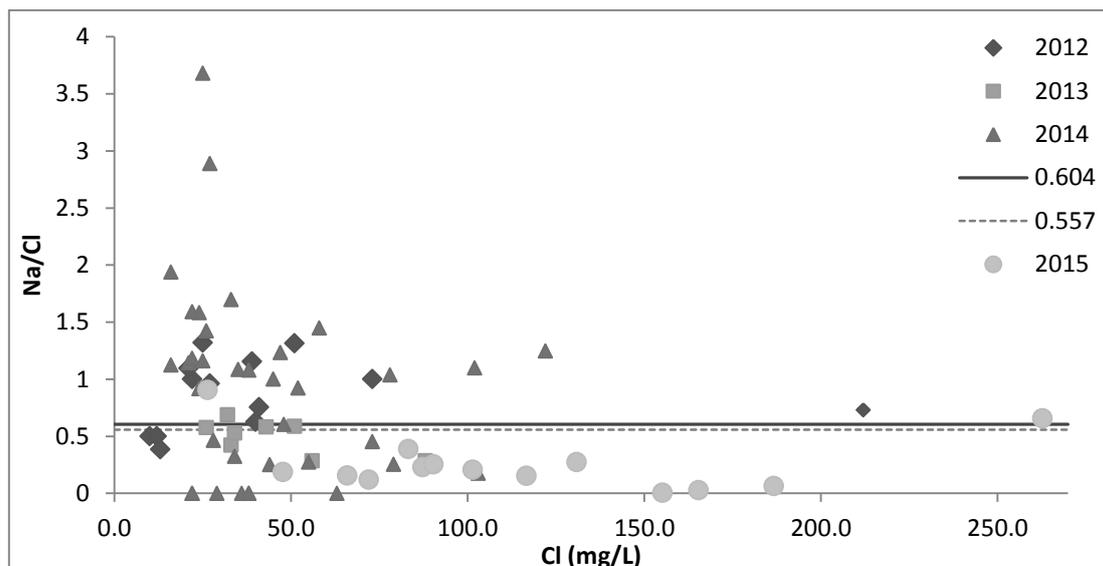


Fonte – Langevin et al. (2008)

- **Na/Cl**

Segundo Shammam e Jacks (2007) a relação Na/Cl pode indicar intrusão salina e descarga de água doce, sendo que valores abaixo de 0.557 indicam intrusão salina e valores acima de 0.604 indicam a descarga de água doce. Observando a Figura 22, que apresenta um gráfico com esta relação *versus* a concentração de Cl, pode-se perceber que há uma distribuição de poços nas duas faixas de valores, porém as análises realizadas no ano de 2015 apresentaram a maioria dos poços na faixa abaixo de 0.557, sendo indicado com intrusão salina. Além disso, percebe-se que mesmo os poços que possuem valor inferior a 100 mg/L Cl, valor considerado por Custódio e Llamas (1983) como padrão para águas subterrâneas, são classificados com intrusão salina por SHAMMAS e JACKS(2007).

Figura 22 - Relação Na/Cl por Cl

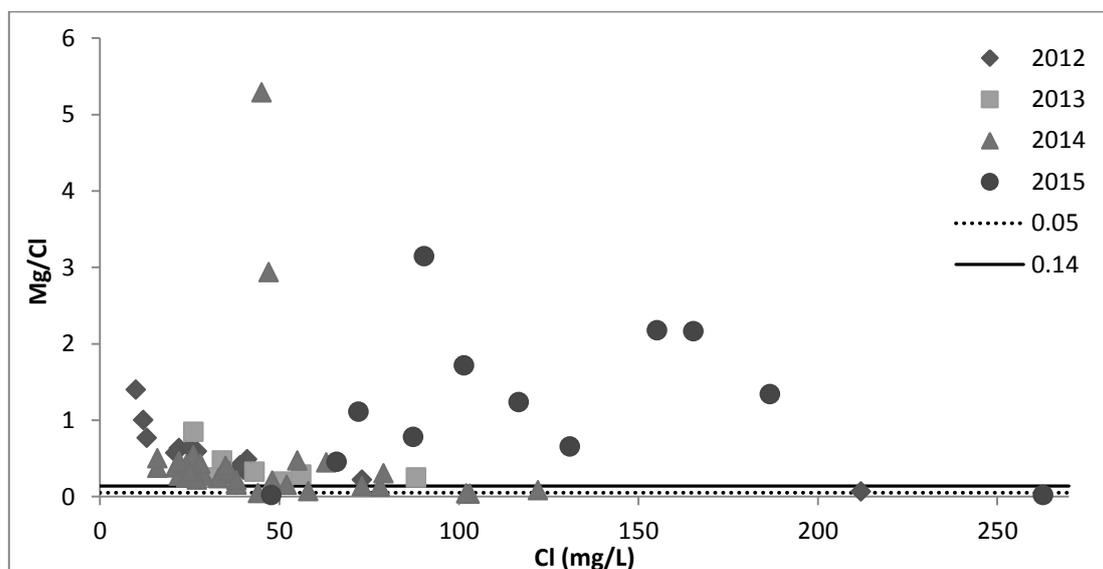


Fonte – Autor (2016)

- **Mg/Cl**

Quando a relação Mg/Cl é próxima a 0,14 ou igual, significa que há uma mistura de descarga de água doce e intrusão de água do mar (SHAMMAS e JACKS, 2007); valores acima de 0,05 significa que há contaminação por água do mar (OLOFSSON, 1996). Esse parâmetro foi de encontro ao parâmetro de Na/Cl, pois considerou grande parte dos poços como sofrendo descarga de água doce, descartando a mistura com água do mar (Figura 23).

Figura 23 - Relação Mg/Cl por Cl

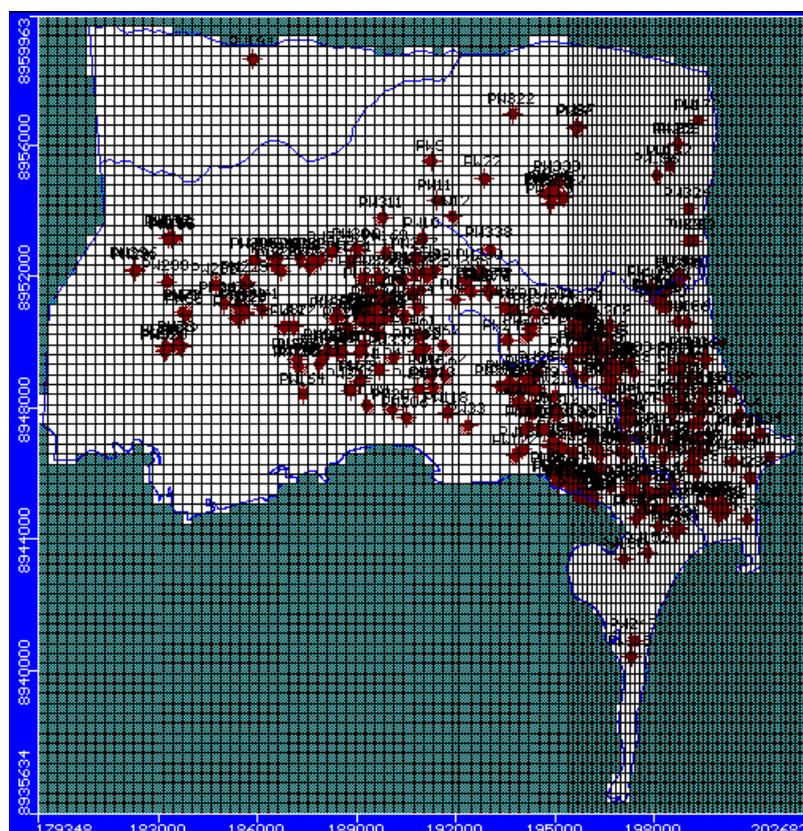


Fonte – Autor (2016)

- $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$

Segundo Shammas e Jacks (2007), infiltrações de fossas sépticas tem relação com o aumento de concentrações de cloretos, porém afirma que os altos valores de cloretos são resultado da intrusão salina, pois a água do mar possui concentração de 18.980 mg/L  $\text{Cl}^-$ . Na Figura 24 os pontos em vermelho representam os poços de bombeamento, podendo perceber a grande concentração deles, pois estão localizados nas regiões de maior densidade populacional do domínio.

**Figura 24 - Distribuição dos Poços de Bombeamento no Domínio**



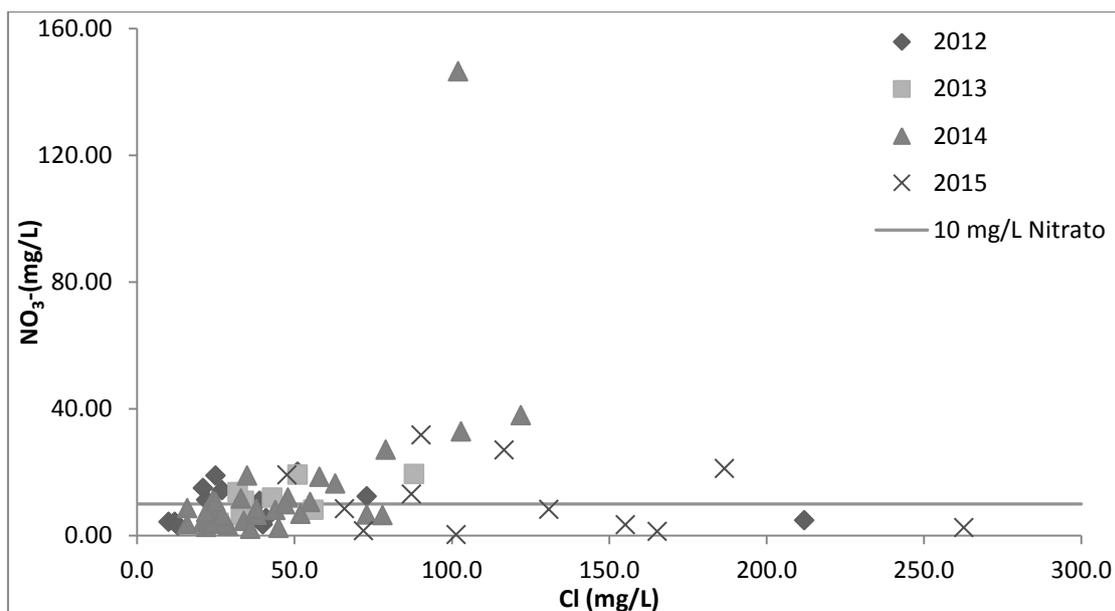
Fonte – Autor (2016)

A deficiência em rede pública coletora de esgoto proporcionou a utilização de técnicas de tratamento de efluentes alternativas em Maceió, sendo muito utilizada a fossa séptica e, em alguns casos mais precários, o lançamento direto de efluentes domésticos nas vias públicas e em cursos d'água; o que é mais observado nas regiões mais altas do domínio. Em contraste, a área mais próxima ao mar, região baixa da área de estudo, é contemplada por rede pública de esgotamento sanitário, o que não significa

ausência de infiltrações, pois há perdas nas tubulações; porém em análise realizada por Oliveira et al. (2015) foi observado que há menores valores de nitrato em poços de região que possui rede pública coletora de esgoto, quando relacionado com região que utiliza a técnica de fossa séptica/sumidouro.

A Figura 25 mostra a relação  $\text{NO}_3^-$  e  $\text{Cl}^-$ ; considerando que os poços do ano de 2015 apresentaram valores mais altos de concentração de cloretos e menor concentração de nitrato e que estão localizados na região que possui rede pública de coleta de esgoto, então se pode afirmar que há maior influência da água do mar do que das infiltrações do esgoto doméstico (Shammas e Jacks, 2007). Os poços dos anos de 2012 a 2014 foram inventariados e estão localizados na região mais alta em relação ao nível do mar, estes possuem valores de nitrato alto, em sua maioria, salvo algumas exceções, e valores não tão altos de cloretos, atingindo em maioria o máximo de aproximadamente 100 mg/L de concentração. Portanto pode haver influência do esgoto doméstico nesses valores de cloretos, mas o que fica realmente evidente é a influência da falta de rede pública coletora de esgoto na concentração de nitrato. Existe ainda um ponto que atenta pelo altíssimo valor de nitrato, 145,5 mg/L  $\text{NO}_3^-$ , enquanto de cloretos 102 mg/L, deixando evidente neste ponto uma grande contaminação por resíduos domésticos, já que este ponto se localiza no Bairro do Jacintinho em Maceió, onde há grande problemática com lançamento de efluentes domésticos em vias públicas e utilização de fossas sépticas.

**Figura 25 - Relação Nitrato e Cloretos**

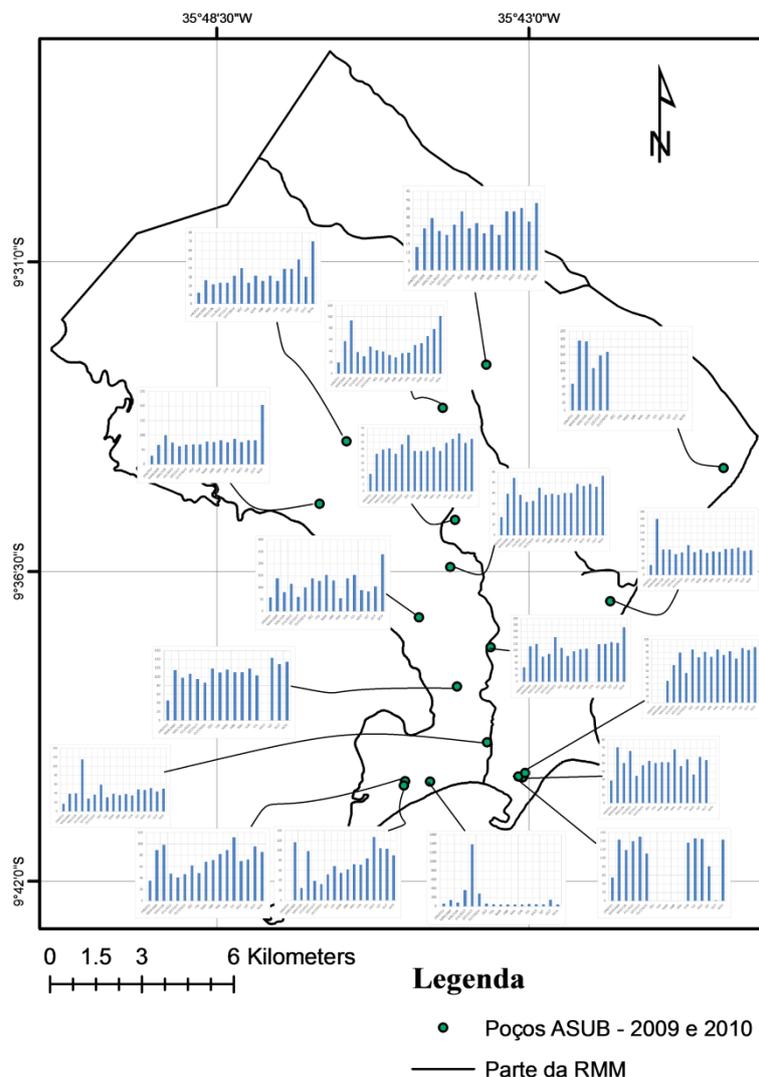


Fonte – Autor (2016)

É importante destacar que segundo a Portaria nº 2.914 do Ministério da Saúde de 12 de dezembro de 2011, a qual regulamenta os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, o valor máximo permitido de nitrato para abastecimento humano é de 10 mg/L  $\text{NO}_3^-$ .

Ademais, os dados do projeto ASUB foram coletados nos anos de 2009 e 2010 numa sequência de mês a mês em diversos pontos do domínio. Para cada poço foi possível observar que há uma grande diferença nos valores de  $\text{Cl}^-$  para cada mês de coleta, como pode ser observado na Figura 26.

**Figura 26 - Variação Mensal da Concentração de Cloretos**



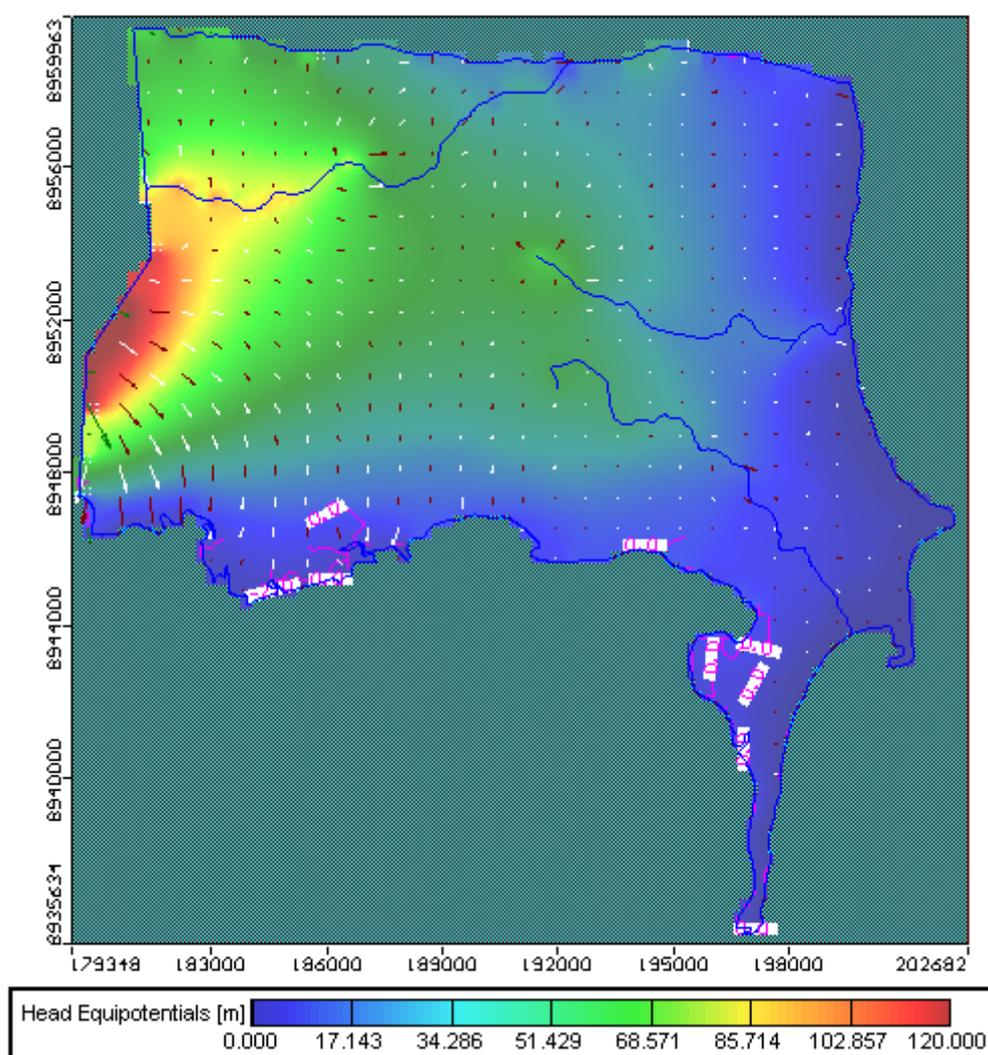
Aryane Mota de Oliveira  
Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento  
Universidade Federal de Alagoas

Fonte – Autor (2016)

## 6.2 Modelo de Fluxo Subterrâneo no SEAWAT

O resultado para o modelo de fluxo subterrâneo para a área de interesse resultou na Figura 27, que mostra as maiores cargas hidráulicas partindo da falha geológica e decaindo em direção ao Oceano Atlântico.

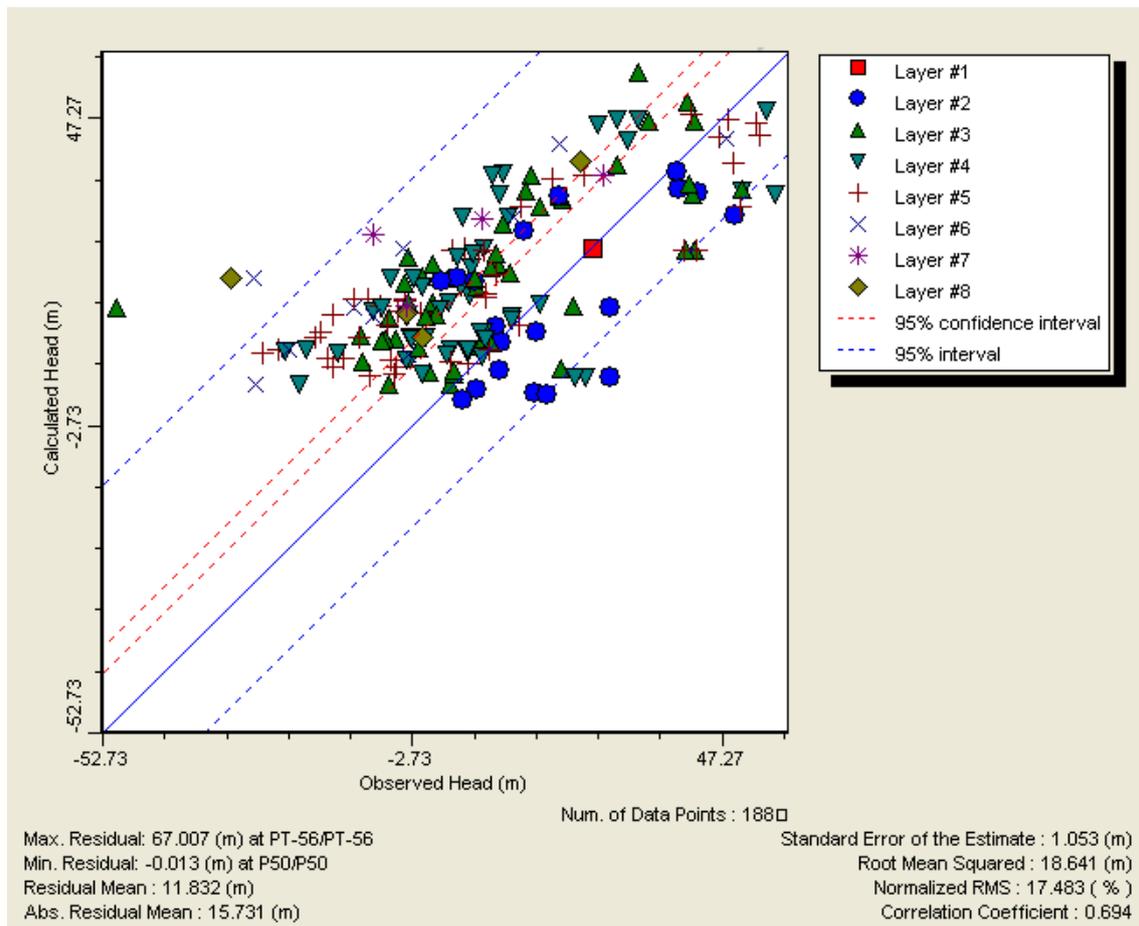
**Figura 27 - Modelo de Fluxo Subterrâneo no SEAWAT**



Fonte – Autor (2016)

A princípio o fluxo foi calibrado para uma situação sem bombeamento, com apenas 8 *layers*, sendo 4 *layers* na primeira camada, que representa a formação Barreiras e mais 4 *layers* na segunda camada, que representa a formação Marituba. Desta forma o resultado da calibração, comparação entre as cargas hidráulicas observadas e calculadas, resultou em um coeficiente de correlação de 0,694 (Figura 28).

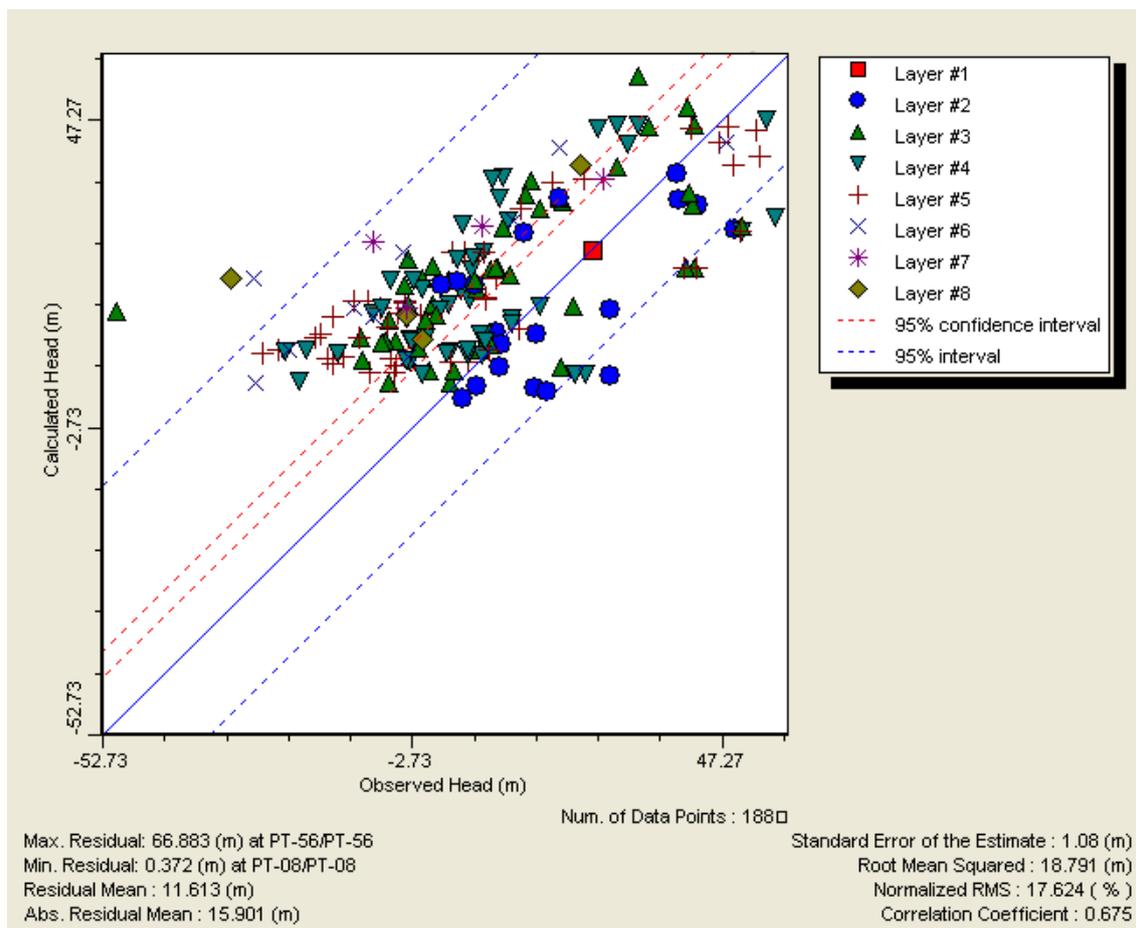
**Figura 28 - Comparação entre as Cargas Hidráulicas Observadas e Calculadas com 8 Layers**



Fonte – Autor (2016)

Quando os poços de bombeamento foram adicionados ao domínio houve um decaimento no coeficiente de correlação para 0,675 (Figura 29).

**Figura 29 - Comparação entre as Cargas Hidráulicas Observadas e Calculadas com 8 Layers e Bombeamento**

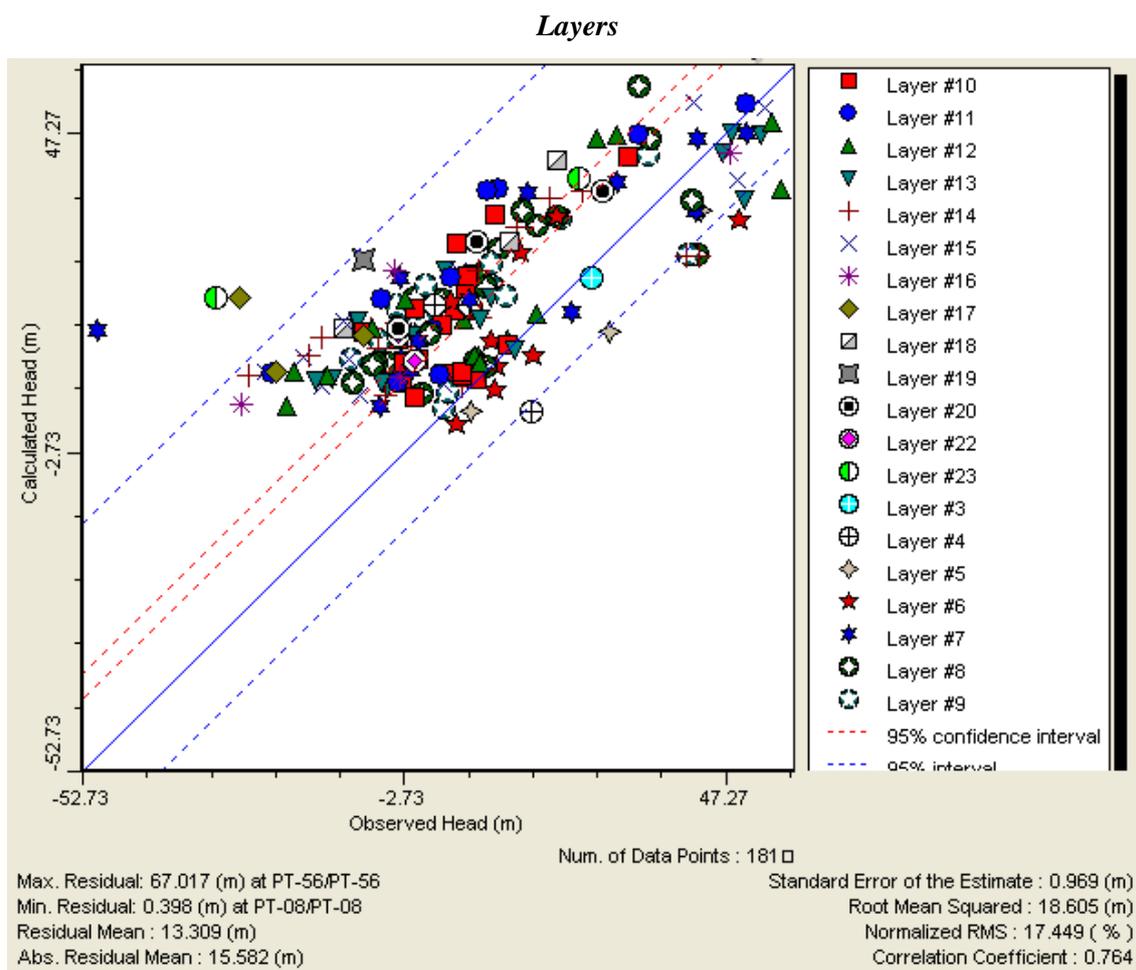


Fonte – Autor (2016)

Uma análise sistemática realizada por Al-Maktoum et al. (2007) afirma que o código SEAWAT é sensível a escolha de dimensão da rede, passo de tempo e esquema numérico para problemas de fluxo instáveis. E sugere o tamanho da grade de 0,38 e 0,60% do total do comprimento e profundidade do domínio, respectivamente, para gerar resultados com exatidão aceitável.

Essa proporção se tornou inviável para ser aplicada no presente trabalho, pois o tempo de convergência seria muito grande e também havia uma carência de máquinas que conseguissem comportar. De qualquer forma, houve uma maior discretização dos *layers* numa proporção de aproximadamente 3% da profundidade do domínio, salvo variações devido a topografia. As camadas foram divididas em 12 *layers* cada, assim foi obtido um coeficiente de correlação de 0,764 considerando apenas 90 dias de bombeamento, todavia foi realizado o acréscimo dos 342 poços de bombeamento e considerando 10 anos de exploração da água subterrânea (Figura 30).

Figura 30 – Comparação entre as Cargas Hidráulicas Observadas e Calculadas com 24



Fonte – Autor (2016)

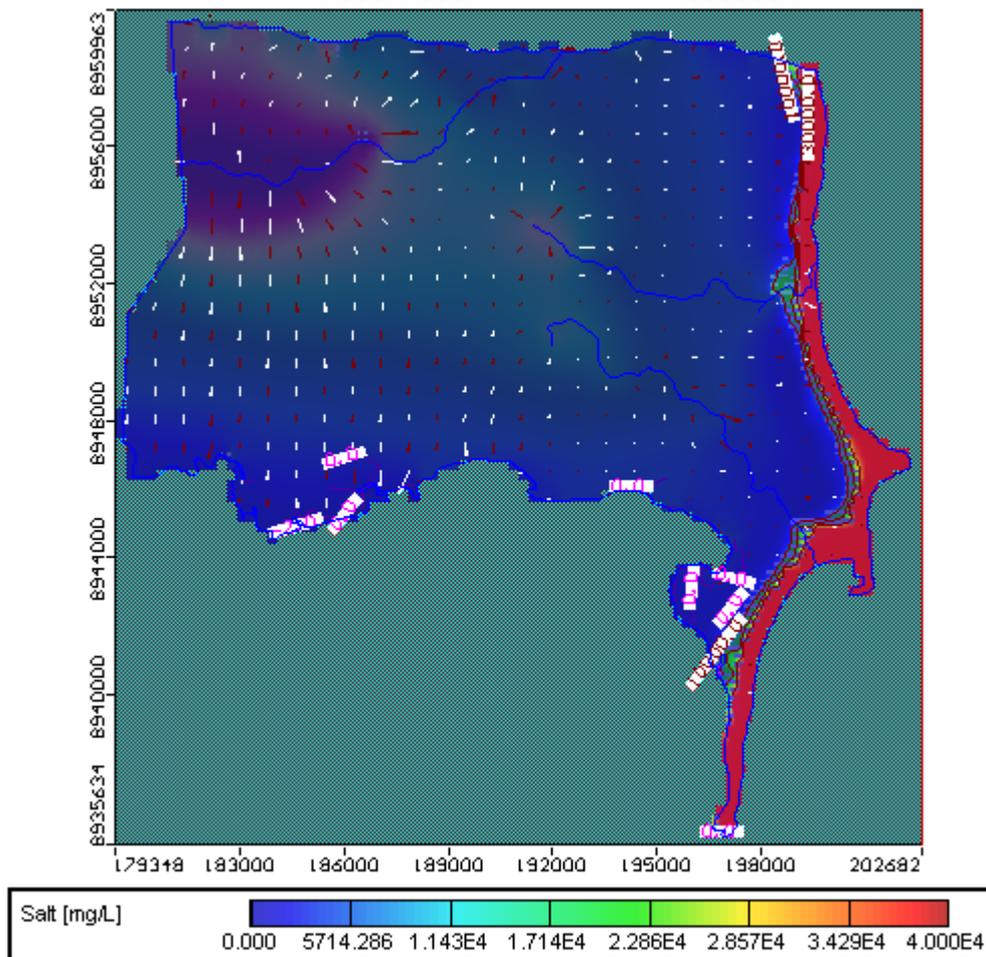
Este valor de coeficiente de correlação apresentou um decaimento em relação ao apresentado por Menezes Jr. (2011), o qual no melhor cenário estabelecido apresentou um coeficiente de correlação de 0.776. No entanto é importante destacar que o SEAWAT utiliza equações diferentes que o MODFLOW, segundo Guo e Langevin (2002), este último foi modificado para resolver a equação de fluxo com a variável de densidade, então os termos da matriz de equações de massa de fluido foram substituídos por volume de fluido e foram incluídos termos apropriados de densidade.

### 6.3 Modelo de Concentração de Sal no SEAWAT

Foi possível calibrar o modelo para o ano de 2015 ativando 342 poços de bombeamento, utilizando a concentração inicial interpolada e dados de observação de concentração de STD, obtendo um coeficiente de correlação entre as concentrações calculadas e observadas de 0,682 e uma média residual absoluta de 52,429 mg/L. Neste

sentido, esta calibração gerou uma superfície de concentração de STD no *layer* 20, como mostrada na Figura 31.

**Figura 31 - Superfície de Concentração de STD para o ano de 2015**

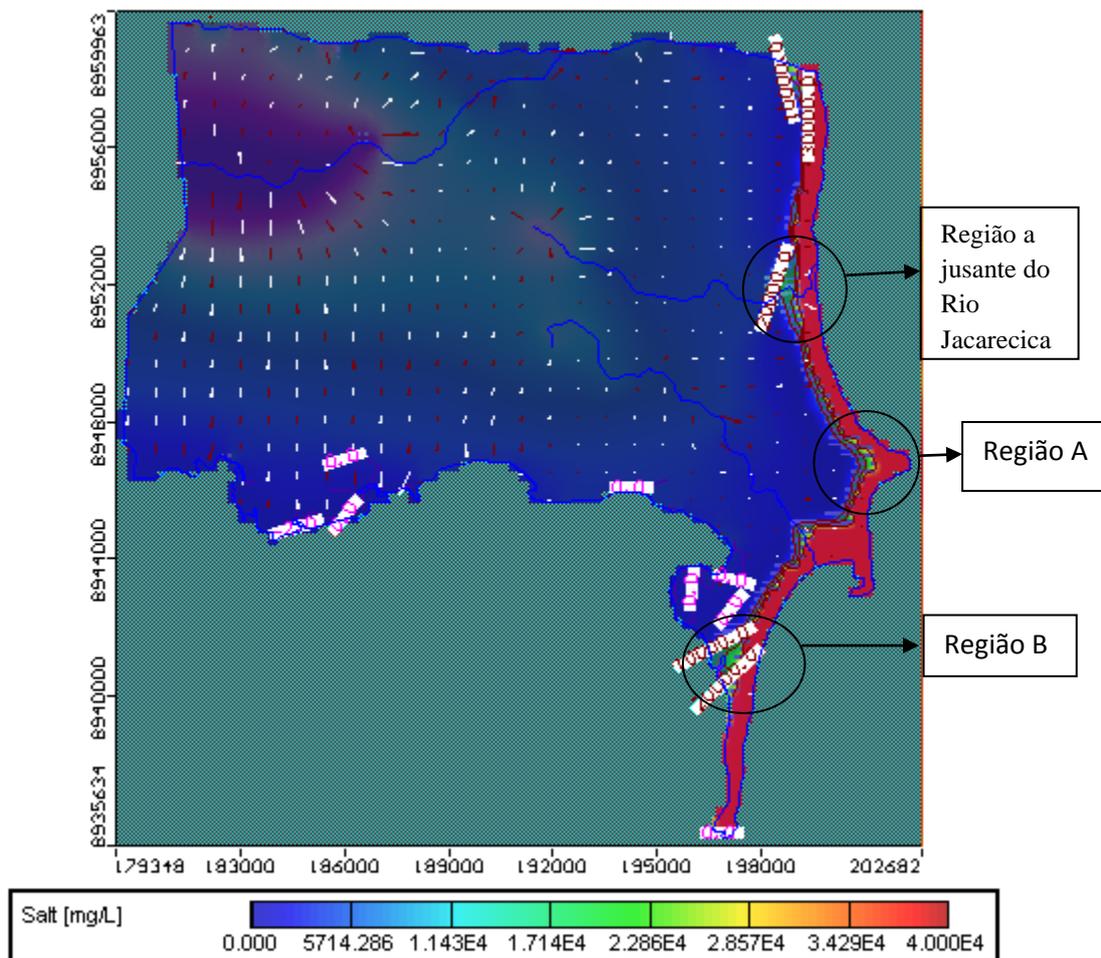


Fonte – Autor (2016)

- **Cenário 1:**

Sem mais acréscimos de poços de bombeamento, apenas aplicando um período de mais 10 anos com a mesma quantidade de poços de bombeamento foi possível gerar outra superfície de concentração STD, Figura 32.

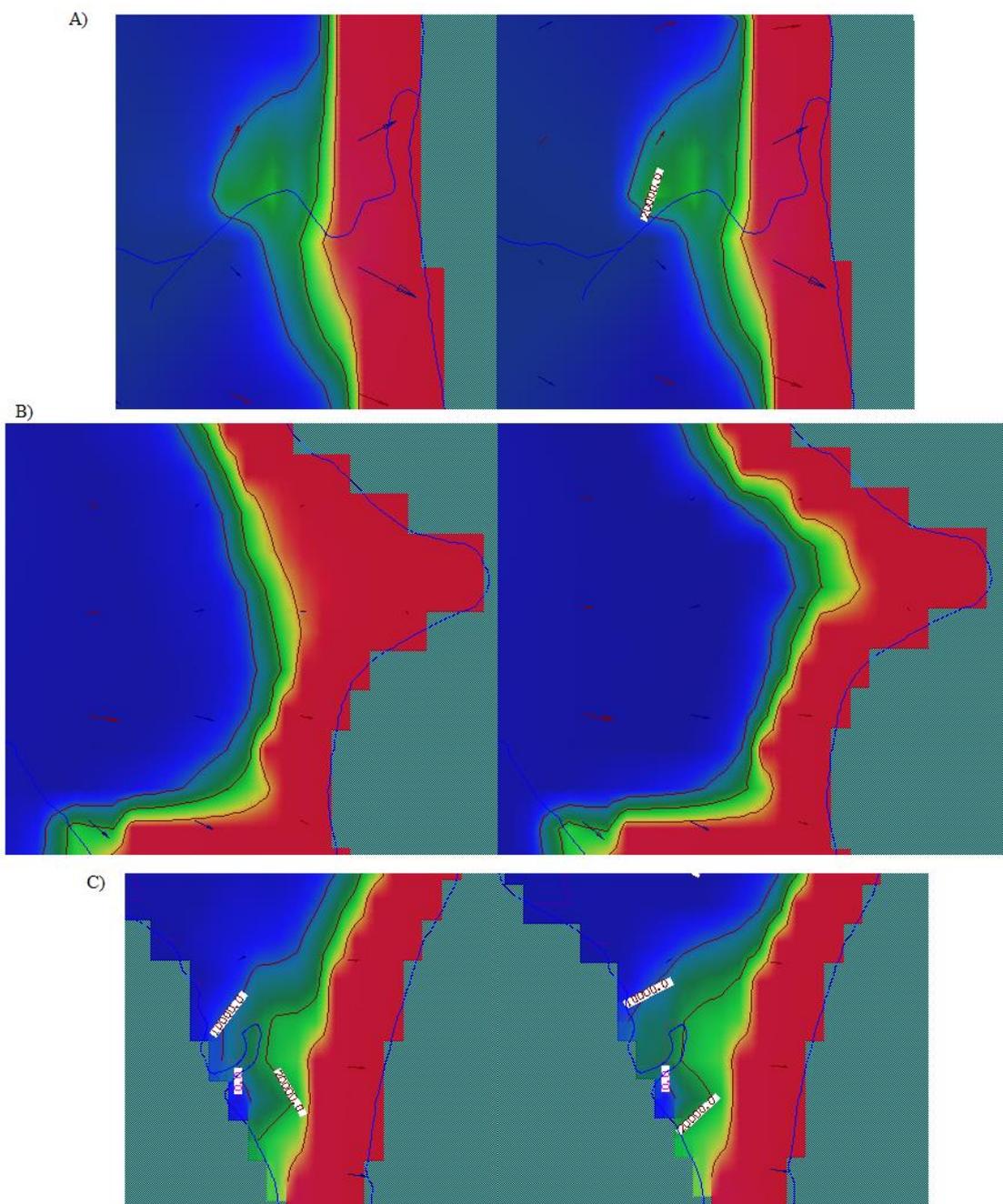
Figura 32 - Superfície de Concentração de STD para o ano de 2025



Fonte – Autor (2016)

De acordo com o resultado gerado pelo modelo é possível observar que há um avanço da cunha salina principalmente em duas regiões, nas proximidades de jusante do Rio Jacarecica e na região B, como está destacado na Figura 33. Dá para perceber também uma mudança na interface entre a água doce e a água do mar na região A.

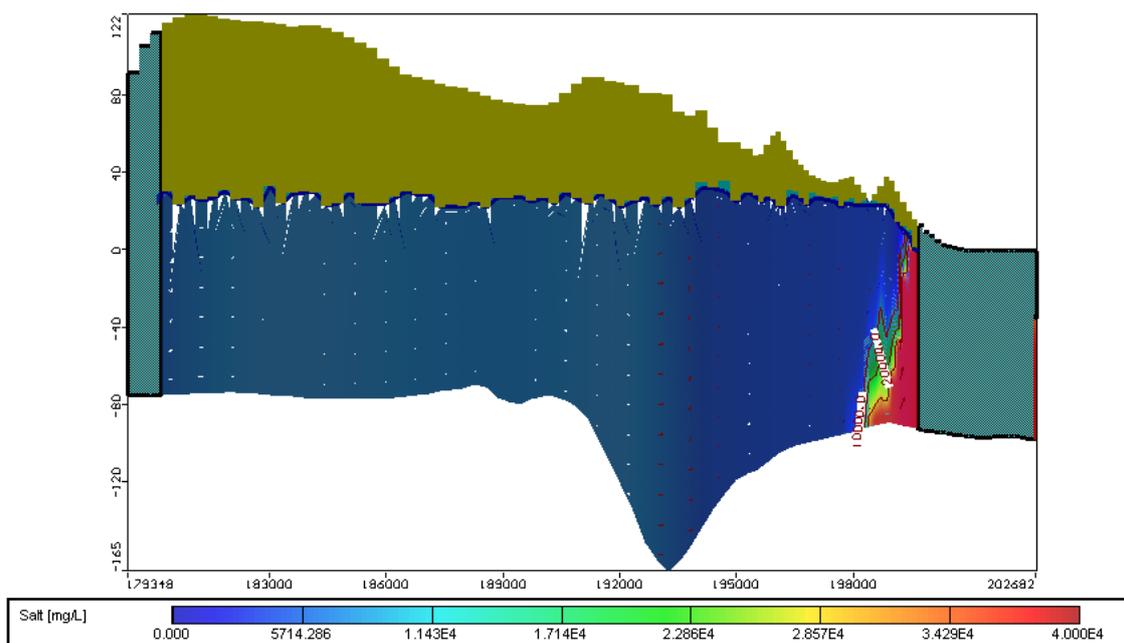
As modificações na interface salina podem ser visualizadas melhor na Figura 34, a qual apresenta em detalhe o ocorrido; sendo A) Região a jusante do Rio Jacarecica, B) Região A e C) Região B. Estas representam as regiões mais críticas para perfuração de novos poços, pois já demonstram a modificação da zona de mescla.

**Figura 33 – Modificações na Zona de Mescla em Detalhe**

Fonte – Autor (2016)

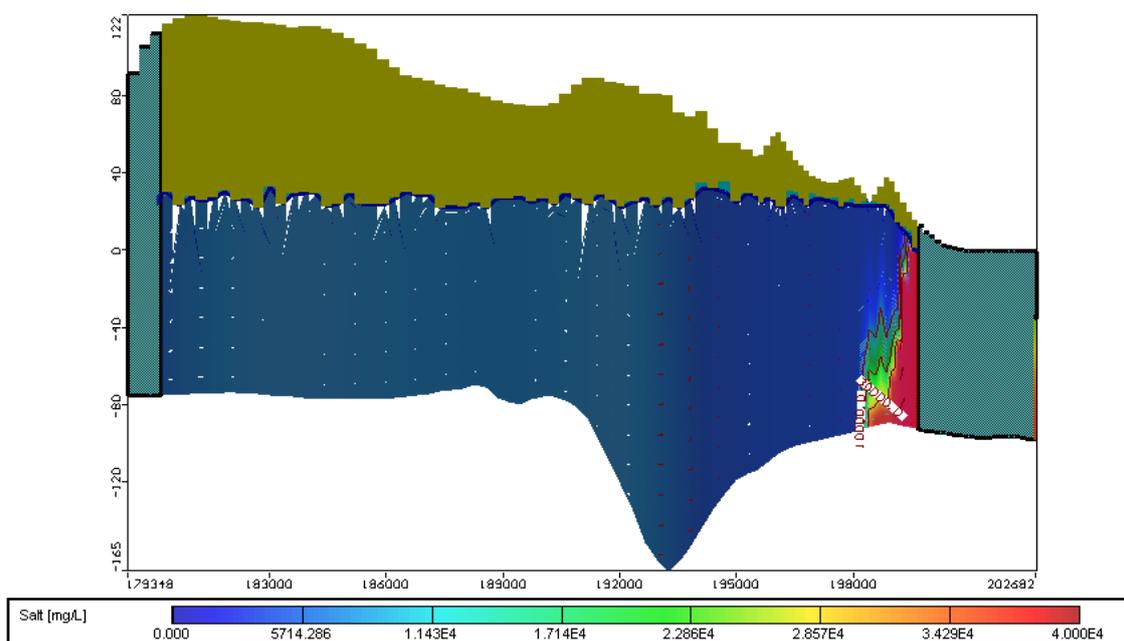
Através da comparação de um perfil do domínio no ano de 2015 para o perfil no ano de 2025, é possível perceber que há uma diferença na interface existente entre a água doce e a água do mar. O mesmo ponto apresentou valores de concentração de 444,611 e 3.011,87 mg/L STD para as anos de 2015 e 2025, respectivamente, Figuras 34 e 35.

**Figura 34 – Perfil do Domínio para o Ano de 2015**



Fonte – Autor (2016)

**Figura 35 - Perfil do Domínio para o Ano de 2025**



Fonte – Autor (2016)

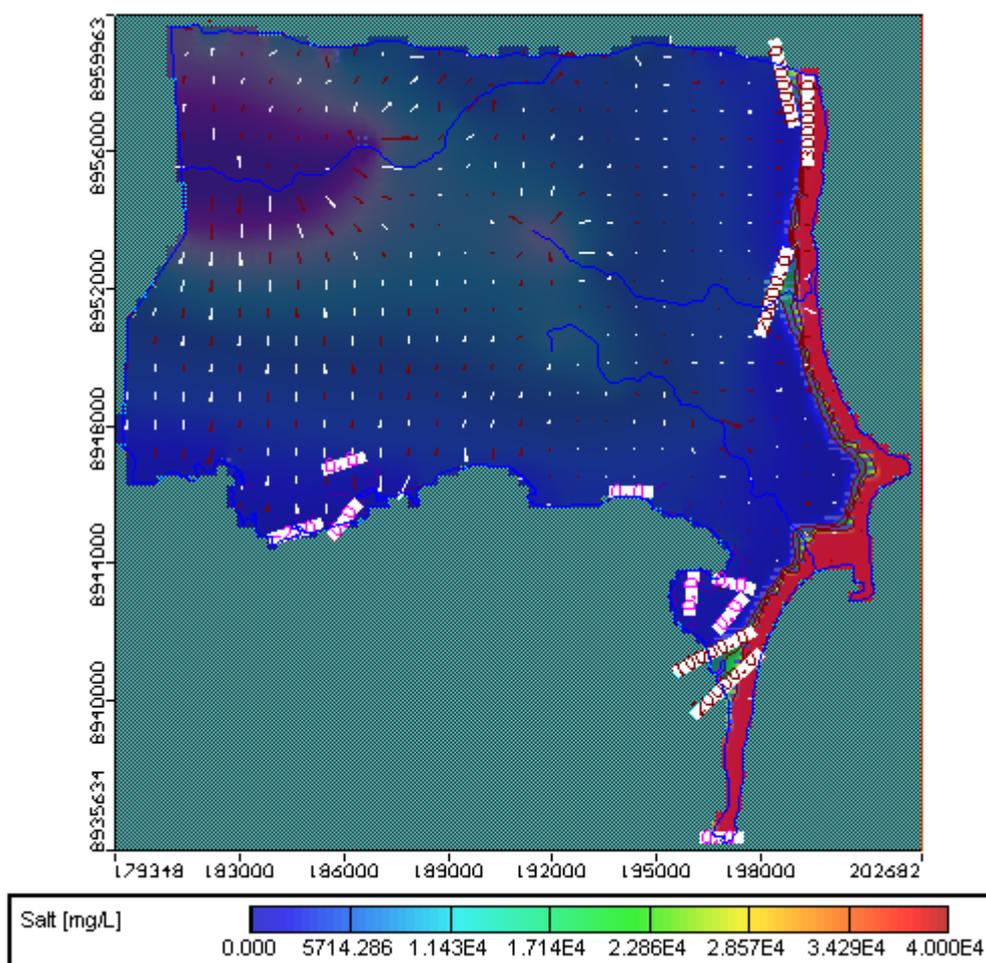
Neste sentido, percebe-se que o modelo do ano de 2015 (Figura 34) já apresenta a formação de cones salinos, o que é agravado para o ano de 2025 (Figura 35). Além disso, reafirma o que foi constatado por Rocha (2005), que constatou através do método

de Sondagens Elétricas Verticais a ascensão vertical de cones salinos e desequilíbrio da zona de mescla.

- **Cenário 2:**

Neste cenário foram inseridas vazões de licença de obra hídrica, poços em vias de outorga, e mais 136 poços na região do litoral norte do domínio com vazões hipotéticas, visto a expansão desta região, Figura 36.

**Figura 36 - Superfície de Concentração de STD para o ano de 2025 com acréscimo de 36 poços**



Fonte – Autor (2016)

Não foi possível perceber mudança na resposta gerada no cenário 1 para o cenário 2 mesmo com a adição de 136 poços, isso pode ter ocorrido devido ao modelo ter interpretado como uma pequena interferência, tendo em vista já a grande quantidade

de poços no modelo, 478 poços. Além disso, por conta da grande quantidade de água disponível no aquífero.

## 7 CONCLUSÕES

- Os índices hidrogeológicos, no geral, demonstraram que há contaminação por água do mar no aquífero;
- Na região próxima à linha Oceano Atlântico a concentração de cloretos é pouco influenciada pela concentração de nitrato;
- A região próxima à linha do mar possui as maiores concentrações de cloretos, no geral;
- Poços com concentrações de cloretos abaixo de 100 mg/L apresentaram indícios de contaminação por água do mar, através da análise de outros índices;
- As concentrações de cloretos são bastante sensíveis à variação temporal;
- O modelo não foi direcionado para representar a variação temporal existente no domínio;
- O modelo representou o aquífero na atualidade com formação de cones verticais salinos e mostrou a ascensão dos mesmos com o passar do tempo, sendo mantida a condição atual de exploração de água subterrânea;
- A inserção de novos bombeamentos não causaram grandes modificações na superfície salina obtida para o ano de 2025 no primeiro cenário estabelecido, o que pode ser justificado pela magnitude do aquífero;
- O litoral norte do domínio apresentou baixa interferência na interface salina.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, G. M. e SILVA Jr, G. C..Fatores Hidrogeológicos no Estudo da Intrusão Salina em Aquíferos Costeiros da Região Litorânea do Município de Maricá – RJ. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**, 2007.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Estudos Hidrogeológicos para Subsidiar a Gestão Sustentável dos Recursos Hídricos Subterrâneos na Região Metropolitana de Maceió**. Vol. III - Testes de Aquífero, Potenciometria, Modelo Numérico, Vulnerabilidade Natural dos Aquíferos e Riscos de Contaminação. ANA, SIP, 2011.
- \_\_\_\_\_. **Estudos Hidrogeológicos para Subsidiar a Gestão Sustentável dos Recursos Hídricos Subterrâneos na Região Metropolitana de Maceió**. Vol. II – Geologia, Hidrogeologia e Hidroquímica. ANA, SIP, 2011b.
- ANDERSON, M. P., WOESSNER, W. W. **Applied Groundwater Modeling Simulation of Flow and Advective Transport**. San Diego: Academic Press. 1992.
- ANDRADE, M. C. ; ALBUQUERQUE FILHO; J. L.; LEITE; C. B. B.; BRAGA, A. C. O.; CARVALHO, A. M.; FERREIRA, A. L.. Avaliação da vulnerabilidade à Contaminação dos Aquíferos Costeiros pela Intrusão Salina em Trecho da Orla de Fortaleza, CE, Brasil. **Revista Águas Subterrâneas**, 2012.
- APPELO , C. A. J. & POSTMA, D. 2005. **Geochemistry, Groundwater and Pollution**. A .A Balkema. Rotterdam, Brookfield. 2nd Ed.,728 p.
- ASUB. **Integração dos instrumentos de Outorga, Enquadramento e Cobrança para a Gestão das Águas Subterrâneas**. FINEP. CT-HIDRO-IGRH. 2011.
- BRASIL. **Ministério da Saúde**. Gabinete do Ministro. Portaria Nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011. Diário Oficial da União. 2011.
- BOUDERBALA, A. Groundwater salinization in semi-aridzones: an example from Nador plain (Tipaza, Algeria). **Environmental Earth Sciences**. (2014)
- CETESB. Disponível em: <[http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/agua/aguas-superficiais/aguas-interiores/variaveis/aguas/variaveis\\_quimicas/cloreto.pdf](http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/agua/aguas-superficiais/aguas-interiores/variaveis/aguas/variaveis_quimicas/cloreto.pdf)>. Acessado em 21 de janeiro de 2015 às 15h.
- CHANDRAJITH, R. et al. Quantification of groundwater-sea water interaction in a coastals and aquifer system: a study from Panama, Sri lanka. **Environ Earth Sci**. 2013.
- COBANER, M. et al. Three dimensional simulation of seawater intrusion in coastal aquifers: A case study in the Goksu Deltaic Plain. **Journal of Hydrology**. 464-465 (2012) 262-280 p.
- CRUZ, A. & SILVA JÚNIOR, G. C. 2006. Spatial and temporal hydrochemical behavior of Piratininga coastal aquifer, Niterói City, Brazil. In: **SALT WATER INTRUSION MEETING**, 19, Cagliari, Italy, 2006. Proceedings of the 19th SWIM, v. 1, p. 12-18.

- CRUZ, A.; SILVA JÚNIOR, G. C. & ALMEIDA, G.M. 2006. **Modelagem hidrogeoquímica do aquífero freático da restinga de Piratininga**, Niterói-RJ. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 14, Curitiba, 2006. *Anais*, v.1, p. 1-19.
- CUSTODIO, E., 1987. **Groundwater problems in coastal áreas**. Capítulo 2, UNESCO, Belgica, ISBN: 92-3-102415-9.
- CUSTÓDIO, E., LLAMAS, M. R. **Hidrología subterránea**. 2. Ed. Barcelona: Omega, 1983. 2v.
- FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. 2ª edição. CPRM – Serviço Geológico do Brasil. 2000.
- FETTER, C. W. **Applied Hydrogeology**. 2. Ed. New York: Macmillan Publishing Company, 1988
- GUO, W., AND LANGEVIN, C.D. 2002. User's Guide to SEAWAT: A Computer Program for Simulation of Three-Dimensional Variable-Density Ground-Water Flow. U.S. **Geological Survey**. Tallahassee, Florida.
- GURGEL, G. J. B. et al. **Avaliação da Possibilidade da Intrusão Salina na Planície do Recife em Pernambuco**. XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. (2004).
- HEM, J. D., 1985. Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2254, 3ª edição.
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acessado em 10 de Março de 2016, as 13:12.
- KINZELBACH, W. **Groundwater Modelling**. Developments in Water Science, Amsterdam, n. 25. 1986.
- KERROU, L; RENARD P.; TARHOUNI, J. (2010). Status of the Korba groundwater resource (Tunisia): observations and three-dimensional modeling of seawater intrusion. **Hydrology Journal** (2010) 18: 1173 – 1190.
- LANGEVIN, C.D., SHOEMAKER, W.B., AND GUO, W. 2003. MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model -- Documentation of the SEAWAT-2000 Version with the Variable-Density Flow Process (VDF) and the Integrated MT3DMS Transport Processes (IMT). U.S. **Geological Survey**. Tallahassee, Florida.
- LANGEVIN, C. D. et al. 2008. **SEAWAT Version 4: A computer program for simulation of multi-species solute and heat transport**. U. S. Geological survey Techniques and Methods Book 6, Chapter A22, 39p.
- LIMA, I. F. (1990). **Maceió, a Cidade Restinga – Contribuição ao Estudo Geomorfológico do litoral alagoano**. EDUFAL, p. 255.

LOUREIRO, E. **Bacia de Sergipe-Alagoas**. Licitações de Petróleo e Gás. Superintendência de Definição de Blocos. Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. 2013.

MARQUES, J.A.F. (2004). **Estudos de Estacas Escavadas de Pequeno Diâmetro, com Bulbos, Instrumentadas em Profundidade, em Terrenos Sedimentares**. Tese de Doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 319p.

MARQUES, J. A. F.; MARQUES, A. G. **Prática de Fundações no Estado de Alagoas**. In: ABMS – Núcleo Nordeste. (Org.). Geotecnia no Nordeste. Recife: Universidade da UFPE, 2005, v. único, p. 247-264.

McDONALD, M. G. AND HARBAUGH, A. W., 1988, **A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model**: U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6, Chapter A1, 586p.

MCNEIL, V.H., COX, M.E., 2000. Relationship between conductivity and analysed composition in a large set of natural surface-water samples, Queensland, Australia. **Environ. Geol.** 39 (12), 1325–1333.

MENEZES Jr. **Calibração de um Modelo de Fluxo Subterrâneo para a Região Metropolitana de Maceió**. Monografia – Engenharia Ambiental e Sanitária – UFAL. 2011.

NOBRE, M. M. M.; NOBRE, R. C. M., 2001. Caracterização hidrogeológica para o Uso Racional e Proteção dos Mananciais Subterrâneos em Maceió-AL. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n.1, pp.7-20. 2001.

NOBRE, R. C. M. **Avaliação de risco para uso e proteção de aquíferos**. Estudo de caso: Região Metropolitana de Maceió – AL. Tese de doutorado – Programa de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.2006.

OLIVEIRA, A. M. et al. **O efeito do saneamento nas concentrações de nitrato nas águas subterrâneas**. IV Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo. ABAS. 2015.

OLOFSSON, B. O., (1996). **Salt groundwater in Sweden-occurrence and origin**. 14th salt-water intrusion meeting, Malmo, Sweden, 16–21 June 1996, pp 91–100

POLLOCK, D. W. **User's Guide for MODPATH/MODPATH-PLOT, Version 3: A particle tracking post-processing package for MODFLOW, the U. S. Geological Survey finite-difference ground-water flow model**. U. S. GEOLOGICAL SURVEY, Open-File Report 94-464. 1994.

ROCHA, W. J. S. **Estudo da Salinização das Águas Subterrâneas na Região de Maceió a partir da Integração de Dados Hidrogeológicos, Hidrogeoquímicos e Geolétricos**. Tese - Instituto de Geociências da Universidade de Brasília (UnB). Relatório, 193p. 2005.

SALDANHA, L. A. R. et al. **Contribuição da Geologia na Qualificação de Áreas para fins Hidrogeológicos em Alagoas**. 1º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Recife, PE, pp. 223-231. 1980.

SEFELNASR, A.; SHERIF, M. (2014). Impacts of seawater rise on seawater intrusion in the Nile Delta Aquifer, Egypt. **Groundwater**. 52v. 264 – 276p.

SHAMMAS, M.I., JACKS, G., 2007. Seawater intrusion in the Salalah Plain Aquifer, Oman. **Environ. Geol.** 53, 575–587.

SILVA JÚNIOR, G. C. et al. **A Problemática da Intrusão Marinha nos Aquíferos Costeiros do Leste Fluminense: Um Estudo de Caso - A Região Oceânica de Niterói**. CPRM. (2000).

SILVA, W.F. **Avaliação da Vulnerabilidade Natural de Aquíferos à Poluição na Região Metropolitana de Maceió**. Dissertação – Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. 2013.

SINGARAJA, C. et al. (2014). A study on the status of saltwater intrusion in the coastal hard rock aquifer of South India. **Environ Dev Sustain**.

VISION, D. S. et al. (2011).Evaluating salinity sources of groundwater and implications for sustainable reverse osmosis desalination in costal North Carolina, USA. **Hydrogeology Journal** (2011) 19: 981 – 994p.

WATERLOO. **Curso: Modelagem Matemática de Fluxo e Transporte em Águas Subterrâneas**. Teoria e Prática de Aplicações Usando MODFLOW, MT3D, SEAWAT, MGO & WinPEST. Volume 2 – Exercícios. Waterloo Training Course Series. Belo Horizonte, Minas Gerais. 2006

WERNER, A. D. et al. Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges. **Advances in Water Resources**, 51 (2013) 3–26.

ZHENG, C.; WANG, P. P. **MT3DMS: A Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion, and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems**; Documentation and User's Guide. USA Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center. Contract Report SERDP-99-1. December, 1999.