

# **AVALIAÇÃO HIDROQUÍMICA DE UM TRECHO DO SETOR NORTE DA BACIA POTIGUAR E ASPECTOS DA SALINIZAÇÃO, SEMI-ÁRIDO DO RIO GRANDE DO NORTE-BRASIL.**

Paula Stein<sup>1</sup>; José Braz Diniz Filho<sup>1</sup>; Edeweis Rodrigues Carvalho Júnior<sup>2</sup>; Germano Melo Júnior<sup>1</sup>; Natalina Maria Tinoco Cabral<sup>1</sup>; Maria de Fátima Batista de Carvalho<sup>3</sup> & José Carlos Ribeiro Filho<sup>2</sup>

**RESUMO** - As áreas de estudo estão localizadas no setor norte da Bacia Potiguar, semi-árido do Rio Grande do Norte. As unidades hidroestratigráficas aflorantes na área correspondem ao aquífero carbonático superior (Formação Jandaíra) e, sobreposto, a unidade aquífera siliciclástica (Formação Barreiras/Tibau). O aquífero siliciclástico ocorre predominantemente insaturado e constitui uma unidade de recepção e transferência vertical de águas de chuva, otimizando a recarga dos sistemas aquíferos inferiores. O aquífero carbonático superior apresenta um sistema cárstico interligado, resultando num padrão regular de escoamento de águas subterrâneas, ligeiramente controlado pelo relevo. A salinidade do aquífero siliciclástico é sensivelmente superior às águas carbonáticas. O fator climático é o principal responsável pela salinidade elevada observada nas unidades aquíferas inseridas na área. As áreas de Mossoró e Macau estão localizadas próximo à linha de costa e a salinidade das águas pode estar relacionada à intrusão salina natural, que avança na porção continental do aquífero, dadas as condições climáticas desfavoráveis. O aquífero carbonático na área de Assú demonstra condições de águas mais associados aos processos de interação água-rocha e a proximidade dessa área com o sistema de drenagens do Rio Açu pode ser responsável pela mistura de águas subterrâneas e superficiais associados aos aluviões do referido Rio.

**Palavras-Chave:** aquífero cárstico, salinização, intrusão salina natural.

**ABSTRACT** - The studied areas are located in the northern portion of Potiguar Sedimentary Basin, in the semi-arid region of Rio Grande do Norte State, northeast of Brazil. The hydrostratigraphic units present in the area correspond to a carbonatic aquifer and to its overlain siliciclastic aquifer. The siliciclastic aquifer is predominantly unsaturated and constitutes a unit of reception and vertical transference of rainwater, optimizing the recharge of the underlain aquifer systems. The carbonatic

---

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Departamento de Geologia. Endereço: Campus Universitário Lagoa Nova, s/n. Caixa Postal 1524 – CEP: 59072-970 Natal - RN - Brasil. E-mail: paula.stein@gmail.com; brazdf@geologia.ufrn.br; germano@geologia.ufrn.br; natalinacabral@gmail.com

<sup>2</sup> PETROBRAS/UN-RNCE. Gerência de Segurança, Meio Ambiente e Saúde. Endereço: Av. Euzébio Rocha, 1000. Natal-RN. CEP: 59070-900. edeweis@petrobras.com.br; jc-ribeiro@petrobras.com.br

<sup>3</sup> PETROBRAS/CENPES. Endereço: Cidade Universitária, Ilha do Fundão. Rio de Janeiro-RJ. CEP: 21949-900. fatc@petrobras.com.br

aquifer represents a karstic system, resulting in a regular frame for the groundwater flux, controlled by the relief. Climate is the major factor accounting for the high salinity observed in the aquifers. The Mossoró and Macau areas are located near the coast and the salinity of their waters can be related to the natural saline intrusion that advances toward the continental portion of the aquifer, due to the favorable climatic conditions for this phenomenon. The carbonatic aquifer in the Assu area demonstrates water compositions in which water-rock interaction plays an important role. Proximity of this area to the drainage system of the regional Açu River may promote a mixture of the ground waters with the superficial waters in the alluvial deposits of the referred river.

Key words: karstic aquifer, salinization, natural saline intrusion.

## 1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho faz parte de um Projeto de Pesquisa intitulado "Estabelecimento de Valores de *Background* para Solos e Águas Subterrâneas em Três Áreas Representativas da Bacia Potiguar (*Onshore*), RN", visando o atendimento de demanda específica da PETROBRAS/UN-RNCE, sendo executado pelo Departamento de Geologia da UFRN.

Para a execução do projeto dentro da linha de pesquisa de hidrogeologia foram realizadas uma série de levantamentos (inventário de poços, sondagens a percussão, nivelamento topográfico) visando um maior conhecimento hidrogeológico da área, de forma a subsidiar a locação e execução de poços de monitoramento nas três áreas de pesquisa. Na oportunidade são apresentados os resultados hidroquímicos obtidos no estudo e que subsidiaram os objetivos do projeto.

## 2. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA

As áreas de estudo (Figura 1) estão localizadas no setor norte da Bacia Potiguar, semi-árido do Estado do Rio Grande do Norte. Nessa porção da Bacia Potiguar afloram 2 unidades litoestratigráficas:

- Material siliciclástico de idade Tércio-quaternária e Quaternária: atribuídos às Formações Barreiras, Tibau e Potengi e às Paleocascalheiras e sedimentos aluvionares. Compostos por arenitos e areias mal consolidadas com intercalações argilosas;
- Material carbonático de idade Cretácea: correlacionados à Formação Jandaíra, composto por calcários diversos, muito compactos, com intercalações de argilitos/siltitos e arenitos calcíferos.

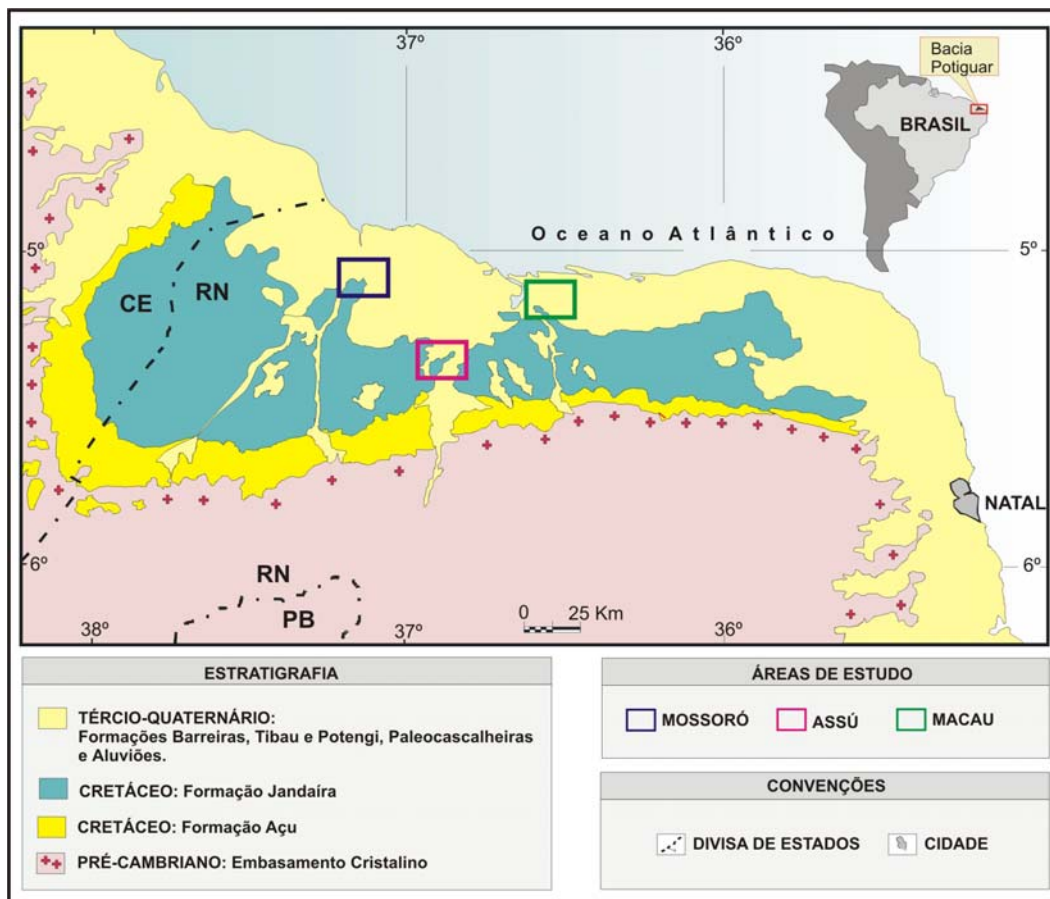


Figura 1. Mapa geológico simplificado e localização das áreas de estudo.

A denominação da área de trabalho foi escolhida segundo a maior abrangência dentro do município. Dessa forma, a área denominada de Mossoró abrange parcialmente os municípios de Mossoró, Areia Branca e Serra do Mel e está situada a aproximadamente 20 km da faixa litorânea norte do Estado. A área de Macau está situada apenas no município homônimo e está localizada no domínio costeiro, onde se observa o desenvolvimento de um sistema flúvio-marinho imposto às drenagens da área. A área de estudo denominada de Assú está localizada nos municípios de Assú e Carnaubais e está situada a oeste do sistema de drenagens do Rio Açu. Na tabela 1 são apresentadas as áreas (km<sup>2</sup>) de abrangência de cada setor estudado.

Tabela 1. Áreas de estudo e características geográficas.

Nome da área de estudo	Municípios inseridos parcialmente	Área (km <sup>2</sup> )
Canto do Amaro	Mossoró, Areia Branca e Serra do Mel	378,67

Estreito	Assu e Carnaubais	203,02
Salina Cristal	Macau	192,27

### 3. CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO DA ÁREA

Os aquíferos que constituem as unidades hidroestratigráficas dessa bacia sedimentar, na porção estudada, correspondem ao aquífero carbonático (Formação Jandaíra) e ao aquífero siliciclástico (Formação Barreiras/Tibau), sobrejacente ao primeiro.

A principal unidade aquífera corresponde ao aquífero carbonático, que apresenta ocorrência contínua e espessura saturada espacialmente uniforme. O aquífero siliciclástico apresenta, em geral, espessura saturada de ocorrência localizada, descontínua. No entanto, compõe uma unidade de transferência de águas de recarga para o aquífero carbonático.

As pesquisas desenvolvidas na área revelaram que o aquífero carbonático estudado apresenta sistemas de cavidades e condutos cársticos interligados, resultando num padrão regular de escoamento de águas subterrâneas, ligeiramente controlado pelo relevo. Para esse aquífero foi possível o estabelecimento da potenciometria da área com o auxílio do *software Surfer 8*, através do método geoestatístico de krigagem (*kriging*). Esses mapas são apresentados na Figura 2, e a seguir são relatados os principais aspectos evidenciados. Para a unidade siliciclástica não foi possível o estabelecimento da potenciometria devido à descontinuidade lateral desse aquífero.

Na área de Mossoró, o escoamento das águas subterrâneas do aquífero carbonático se desenvolve, em geral, no sentido norte/noroeste (no sentido da linha de costa) a partir de um alto potenciométrico estabelecido na porção sul da área. A declividade geral do terreno também é para norte/oeste e o fluxo subterrâneo apresenta tendência a obedecer ao padrão do relevo em relação à drenagem de maior porte, neste caso o Rio Mossoró. No contexto de maior detalhe, em relação às drenagens locais (riachos), não se percebe o controle da topografia sobre o fluxo subterrâneo, com ausência de fontes ou nascentes.

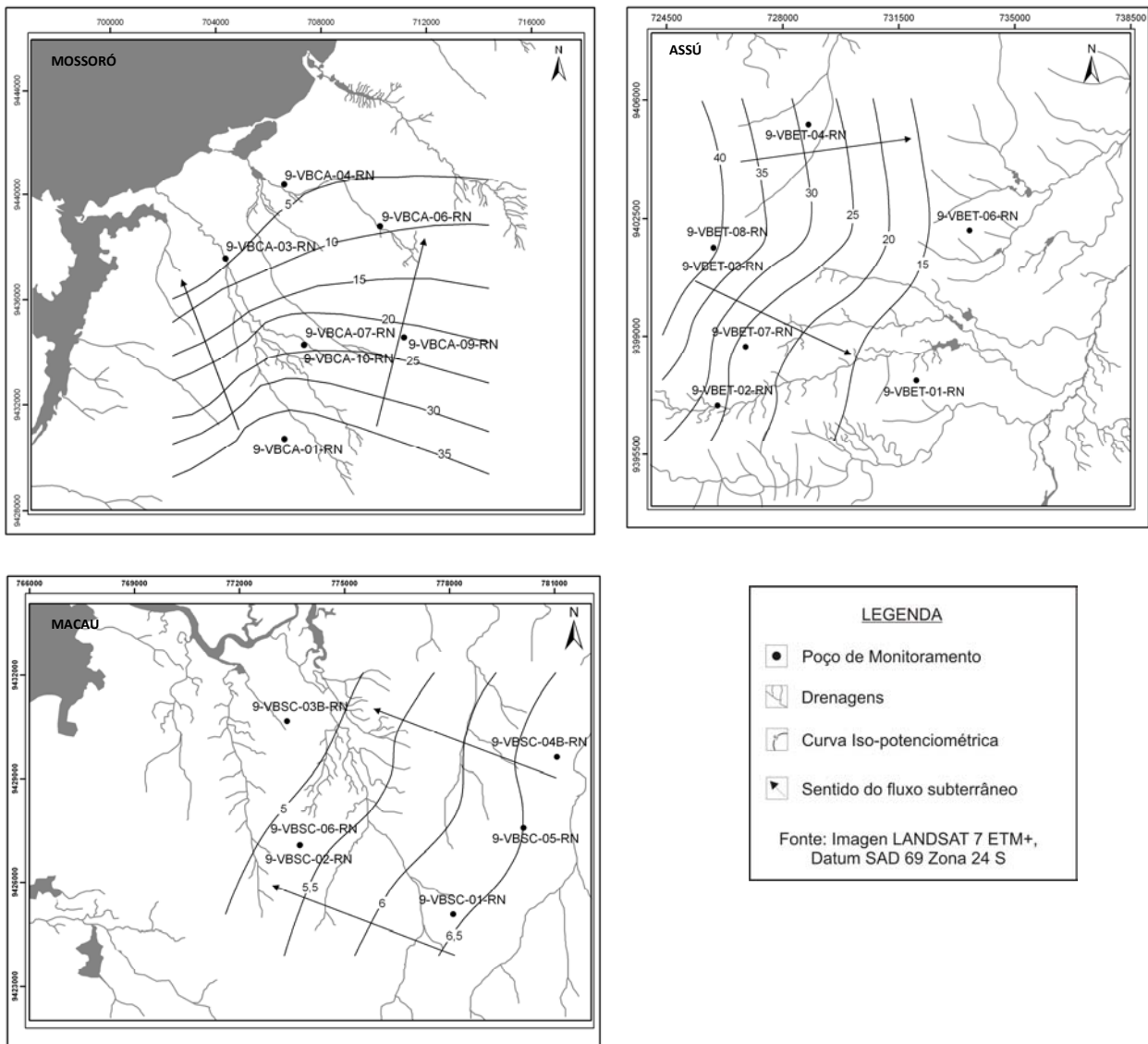


Figura 2. Potenciometria do aquífero carbonático nas áreas estudadas.

Em Assú o mapa potenciométrico revela que o fluxo das águas subterrâneas segue o sentido geral de oeste para leste (no sentido do vale do Rio Açu) a partir de um alto potenciométrico estabelecido na porção oeste da área. O escoamento subterrâneo segue em geral o mesmo padrão do relevo, indicando um controle topográfico sobre o fluxo das águas subterrâneas drenadas no sentido do Rio Açu.

Na área de Macau o mapa potenciométrico mostra que o escoamento das águas subterrâneas se dá para noroeste, no sentido do mar e da planície flúvio-marinha. A declividade geral do terreno é para norte e oeste, mas ao longo das drenagens não há controle sobre a superfície potenciométrica, não havendo evidências de afloramento das águas subterrâneas.

Na Figura 3 pode-se visualizar a pluviometria média mensal das áreas amostradas, na época da execução dos trabalhos de amostragem de águas subterrâneas. De julho a janeiro ocorreram as

menores precipitações mensais para o período observado. A partir daí, as taxas pluviométricas aumentaram até atingirem um pico entre os meses de fevereiro e março, quando voltaram a diminuir. Do ponto de vista hidráulico da recarga dos aquíferos em questão (principalmente o aquífero carbonático) a amostragem entre os meses de maio a julho refere-se ao Período Úmido, já que se considera que toda a precipitação ocorrida entre os meses de janeiro a abril foi suficiente para atingir a zona saturada do aquífero.

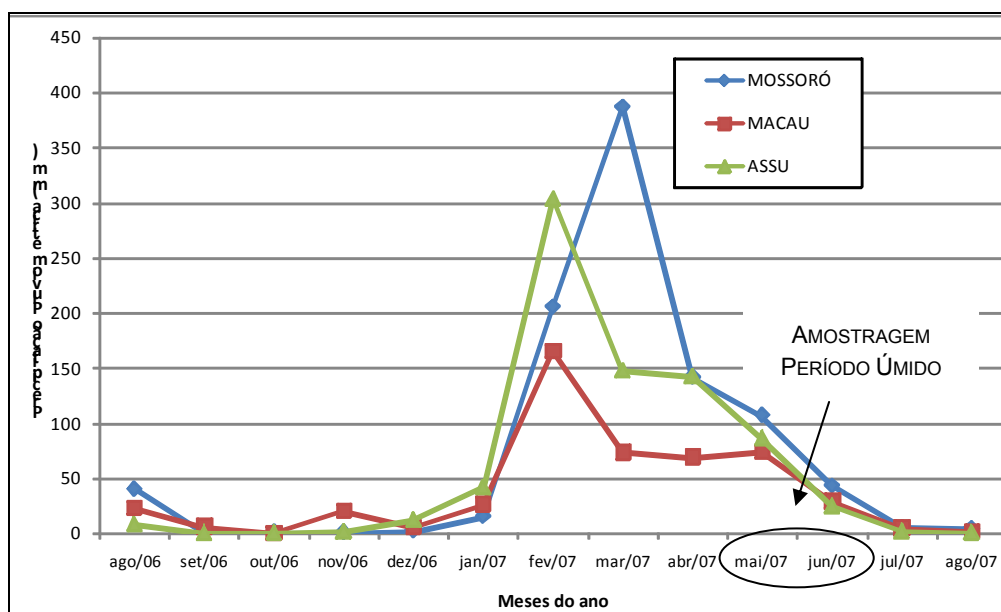


Figura 3. Gráfico da média pluviométrica mensal (mm) de agosto de 2006 à agosto de 2007. Os dados de Mossoró e Macau foram fornecidos pelo INMET e para Assu fornecidos pela EMPARN.

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Os poços de monitoramento foram amostrados pelo sistema de baixa vazão (*low flow sampling*) (Puls & Barcelona, 1996; Nielsen & Nielsen, 2002). Os métodos de amostragem e preservação de águas seguiram os procedimentos adotados pelo *Standard Methods* (AWWA, 2005). Os parâmetros temperatura (T), pH e condutividade elétrica (CE) foram medidos *in loco*. Os cátions foram analisados a partir de alíquota filtrada. As análises de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  foram efetuados no acoplamento indutivo (ICP). Os ânions  $\text{Cl}^-$  e  $\text{SO}_4^-$  foram analisados através dos métodos Argentométrico e Turbidimétrico, respectivamente. Com relação à análise do  $\text{F}^-$ , o método utilizado foi o nº 8029 do espectrofotômetro da marca HACH. O  $\text{HCO}_3^-$  e a dureza foram determinados empiricamente, a partir da alcalinidade, cálcio e magnésio (Hounslow, 1995).

Na Tabela 2 são apresentados os resultados analíticos obtidos para cada poço amostrado em cada área de trabalho, para os aquíferos carbonático e siliciclástico. Os dados correspondem à coleta de águas realizada entre os meses de maio a junho de 2007, caracterizada pelo período úmido da

região. A tabela 3 mostra as estatísticas descritivas das 12 variáveis estudadas, para cada unidade aquífera.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No geral, as águas provenientes da unidade aquífera carbonática são bastante mineralizadas (CE média de 5924  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), devido a contribuição, principalmente, dos íons cloreto, cálcio, sódio e magnésio. São águas pouco ácidas a básicas com pH variando de 6,5 a 8,6. A dureza total é, em média, 2295 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ , sendo, portanto, classificada como águas Muito Duras. Para os sólidos totais dissolvidos o valor médio é da ordem de 3536 mg/L, sendo classificadas como águas Moderadamente Salobras. Da análise da Tabela 2 verifica-se que, de um modo geral, as águas da área de Mossoró e Macau apresentam-se mais enriquecidas em sais, quando comparadas à área de Assú. Como exemplo desse fato, tem-se os poços 9-VBCA-03-RN (em Mossoró) e o 9-VBSC-03B-RN (em Macau) com condutividade elétrica de 26300  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e 22400  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , respectivamente. Na área de Assú a CE mais elevada, assume valores da ordem de 4140  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

O  $\text{Cl}^-$  ocorre em altas concentrações em todos os poços da unidade aquífera carbonática e nas três áreas de estudo. Esse ânion atinge valor máximo de 11660 mg/L no poço 9-VBCA-03-RN (área de Mossoró) e 8725,3 mg/L no poço 9-VBSC-03B-RN (área de Macau). O menor valor encontrado no conjunto dos dados pertence à área de Assú; no poço 9-VBET-02-RN tem-se 110,8 mg/L de  $\text{Cl}^-$ .

Os demais parâmetros do aquífero carbonático apresentam o mesmo comportamento do  $\text{Cl}^-$ , ou seja, apresentam os maiores teores nos poços situados nas áreas Mossoró e Macau. O  $\text{F}^-$  acompanhou essa tendência, com variação de 0,22 mg/L (9-VBET-01-RN) a 1,66 mg/L (9-VBCA-04-RN). Esses teores elevados de  $\text{F}^-$  estão geralmente associados aos teores elevados de  $\text{Na}^+$  e  $\text{SO}_4^{2-}$  (9-VBCA-04-RN e 9-VBCA-03-RN).

As águas provenientes das rochas siliciclásticas apresentam-se mais mineralizadas do que as águas carbonáticas, como mostra o valor médio da condutividade elétrica de 16383  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . São águas pouco ácidas a básicas (pH variando de 6,6 a 7,5). A dureza total é, em média, 4240 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ , sendo, portanto, classificada como águas Muito Duras. Para os Sólidos Totais Dissolvidos o valor médio é da ordem de 9718 mg/L, sendo classificadas como águas Moderadamente Salobras.

O  $\text{Cl}^-$  nas águas do aquífero siliciclástico (média de 5855mg/L) ocorre em maiores concentrações do que nas águas do aquífero carbonático (média 2010mg/L), atingindo o máximo de 10534 mg/L no poço 9-VBCA-02-RN, sendo que as áreas de Mossoró e Macau são as mais enriquecidas desse ânion. Já o  $\text{HCO}_3^-$  variou de 127,87 (9-VBSC-03 A-RN) a 246,79 mg/L (9-VBSCA-05-RN), ocorrendo portanto, em teores menores do que nas águas carbonáticas.

Tabela 2. Parâmetros físico-químicos para as amostras de águas subterrâneas coletadas. CE=Condutividade Elétrica. adm=adimensional. STD=Sólidos Totais Dissolvidos.

Poço	CE	pH	STD	Dureza (CaCO <sub>3</sub> )	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	F <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
	μS/cm	adm	mg/L									
<b>AQUÍFERO CARBONÁTICO</b>												
<b>Área de Mossoró</b>												
9-VBCA-01-RN	1336	7,83	655	447,16	103	6,39	41,7	60,8	224,9	0,28	33	295,65
9-VBCA-03-RN	26300	7,6	18702	9663,91	1689	103	1061	2053	11660	1,04	543	311,97
9-VBCA-04-RN	4000	6,68	2307	1212,55	239	33,1	156	368	778,1	1,66	578	276,94
9-VBCA-06-RN	2560	8,64	1444	730,17	125	28,6	93,7	242	441,3	1,18	264	369,43
9-VBCA-07-RN	4560	6,72	2471	1387,99	435	9,0	85,5	303	1302,5	0,33	47,6	253,35
9-VBCA-09-RN	962	7,34	535	206,44	40	12,9	24,8	105	151,55	0,68	58	226,77
<i>MÉDIA</i>	<i>6620</i>	<i>7,47</i>	<i>4352</i>	<i>2274,70</i>	<i>438</i>	<i>32,17</i>	<i>243,8</i>	<i>522</i>	<i>2426,4</i>	<i>0,86</i>	<i>253,9</i>	<i>289,02</i>
<b>Área de Assú</b>												
9-VBET-01-RN	1471	6,56	898	609,71	147	9,1	68,5	45,6	283,5	0,22	112	378,43
9-VBET-02-RN	1073	6,89	618	477,46	99	6,87	50,9	37,7	110,8	0,48	42,2	369,99
9-VBET-03-RN	4140	6,62	2257	1183,32	282	9,5	116	357	980,8	0,43	181,5	369,5
9-VBET-04-RN	1460	7,58	847	540,68	103	11,7	75,1	93,8	207,8	0,73	123,8	419,99
9-VBET-06-RN	881	7,0	476	338,56	74	6,33	44,3	43,5	114,9	0,33	44	265,9
9-VBET-07-RN	1280	6,91	722	545,88	117	7,62	59,8	55,5	141,7	0,38	99,4	410,5
<i>MÉDIA</i>	<i>1717</i>	<i>6,93</i>	<i>970</i>	<i>615,94</i>	<i>137</i>	<i>8,52</i>	<i>69,10</i>	<i>105,5</i>	<i>306,58</i>	<i>0,43</i>	<i>100,5</i>	<i>369,05</i>
<b>Área de Macau</b>												
9-VBSC-01-RN	3780	6,91	1974	1081,28	222	21,2	128	270	1114,3	0,31	24,1	260,27
9-VBSC-02-RN	12310	6,51	6670	4813,09	843	35,6	565	658	4077,9	0,35	166,5	222,91
9-VBSC-03B-RN	22400	6,54	13105	10987,3	1863	21,9	1091	446	8725,3	0,72	102	140
9-VBSC-04B-RN	8319	6,66	4218	3470,21	728	20,6	365	213	2647,9	0,28	28,3	183,81
9-VBSC-05-RN	3870	7,57	2211	1323,36	245	21,5	164	239	1204,8	0,24	40,9	293,67
<i>MÉDIA</i>	<i>10136</i>	<i>6,84</i>	<i>5636</i>	<i>4335,05</i>	<i>780</i>	<i>24,16</i>	<i>462,60</i>	<i>365,2</i>	<i>3554</i>	<i>0,38</i>	<i>72,36</i>	<i>220,13</i>
<b>AQUÍFERO SILICICLÁSTICO</b>												
<b>Área de Mossoró</b>												
9-VBCA-02-RN	28900	7,59	17708	5690,72	870	186	809	4225	10534	0,8	734	145,24
9-VBCA-05-RN	24900	6,6	15107	4037,45	800	82,7	481	3957	8817,7	0,92	525	246,79
<i>MÉDIA</i>	<i>26900</i>	<i>7,10</i>	<i>16407</i>	<i>4864,09</i>	<i>835</i>	<i>134,3</i>	<i>645,00</i>	<i>4091</i>	<i>9675,8</i>	<i>0,86</i>	<i>629,5</i>	<i>196,02</i>
<b>Área de Assú</b>												
9-VBET-05-RN	3110	6,92	1668	989,63	309	7,84	56,8	188	780,1	0,59	124,6	179,69
<b>Área de Macau</b>												
9-VBSC-03A-RN	19200	7,13	11060	8811,46	1918	23,2	1020	583	7377,6	0,95	65,5	127,86
9-VBSC-04A-RN	5805	7,45	3047	1670,32	355	36,9	181	446	1765,3	0,38	31,65	222,39
<i>MÉDIA</i>	<i>12502</i>	<i>7,29</i>	<i>7053</i>	<i>5240,89</i>	<i>1136</i>	<i>30,05</i>	<i>600,50</i>	<i>514,5</i>	<i>4571,4</i>	<i>0,67</i>	<i>48,58</i>	<i>175,13</i>



Tabela 3. Estatística Descritiva das variáveis utilizadas, para o aquífero carbonático e siliciclástico. n=número de amostras. CE=Condutividade Elétrica. STD=Sólidos Totais Dissolvidos.

	MÉDIA	MEDIANA	DESVIO PADRÃO	MÍNIMO	MÁXIMO
<b>Aquífero Carbonático (n=17)</b>					
CE ( $\mu\text{S/cm}$ )	5923,65	3780	7574,60	881	26300
pH	7,09	6,91	0,59	6,51	8,64
STD (mg/L)	3535,88	1974	5012,52	476	18702
Dureza (mg/LCaCO <sub>3</sub> )	2295,24	1081,28	3255,38	206,44	10987,3
Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	432,59	222	553,80	40	1863
K <sup>+</sup> (mg/L)	21,47	12,9	23,07	6,33	103
Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	246,49	93,7	340,36	24,8	1091
Na <sup>+</sup> (mg/L)	328,88	239	476,22	37,7	2053
Cl <sup>-</sup> (mg/L)	2009,89	778,1	3292,49	110,8	11660
F <sup>-</sup> (mg/L)	0,57	0,38	0,40	0,22	1,66
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	146,37	99,4	168,95	24,1	578
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	297,00	293,67	80,32	140	419,99
<b>Aquífero Siliciclástico (n=5)</b>					
CE ( $\mu\text{S/cm}$ )	16383,00	19200	11458,80	3110	28900
pH	7,14	7,13	0,40	6,6	7,59
STD (mg/L)	9718,00	11060	7141,20	1668	17708
Dureza (mg/LCaCO <sub>3</sub> )	4239,92	4037,45	3170,65	989,63	8811,46
Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	850,40	800	648,31	309	1918
K <sup>+</sup> (mg/L)	67,33	36,9	71,99	7,84	186
Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	509,56	481	407,42	56,8	1020
Na <sup>+</sup> (mg/L)	1879,80	583	2025,73	188	4225
Cl <sup>-</sup> (mg/L)	5854,94	7377,6	4343,65	780,1	10534
F <sup>-</sup> (mg/L)	0,73	0,8	0,24	0,38	0,95
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	296,15	124,6	314,91	31,65	734
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	184,39	179,69	50,22	127,86	246,79

A unidade siliciclástica recebe maior influência direta da água de chuva, que teoricamente facilitaria a diluição das águas do aquífero. O fator climático, por sua vez, deve favorecer o enriquecimento progressivo e temporal de sais no solo, resultante da baixa taxa de precipitação e elevada taxa de evaporação, historicamente atuante na região estudada. Daí, as chuvas subseqüentes tendem a lixiviar esses sais através da zona não saturada, os quais vão progressivamente se acumulando na zona saturada, aumentando a salinidade das águas subterrâneas.

Para a interpretação dos dados quanto aos tipos iônicos de água foi utilizado o diagrama hidroquímico de Piper (Hem, 2005), no qual foram plotadas as concentrações dos íons principais na

água subterrânea:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$  e  $\text{SO}_4^{2-}$ ; expressos em miliequivalentes por litro (meq/L). Esse diagrama permite caracterizar as águas subterrâneas quanto aos íons dominantes, além de facilitar a interpretação dos processos hidrogeoquímicos atuantes.

Foram plotados todos os dados amostrais individualizados por unidade aquífera: carbonática e siliciclástica. Este gráfico pode ser visualizado na Figura 4. Na parte do diagrama de associação de cátions e ânions (losango), observa-se um domínio de águas cloretadas sódico-cálcicas, seguido de bicarbonatadas-cloretadas cálcicas.

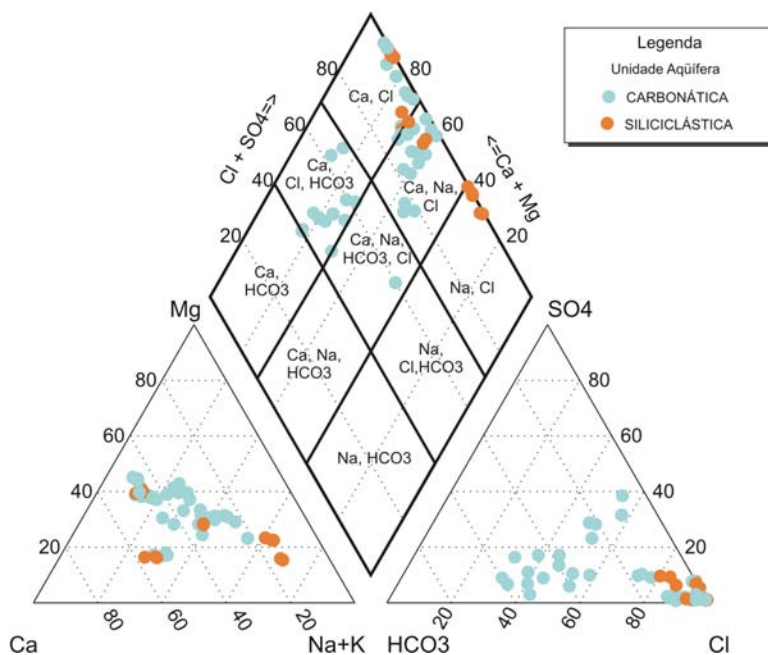
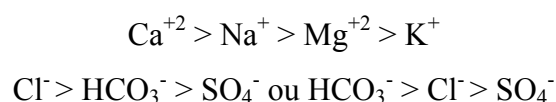


Figura 4. Diagrama trilinear de Piper da unidade aquífera carbonática e siliciclástica.

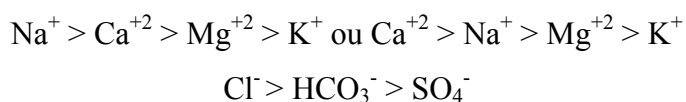
Para as águas armazenadas nas rochas siliciclásticas tem-se uma concentração de pontos no vértice inferior direito do triângulo dos ânions e dispersão no domínio central do triângulo dos cátions. Ocorre um predomínio de águas cloretadas, cujos tipos iônicos dominantes são águas cloretadas sódicas, cloretadas sódico-cálcicas e cloretadas cálcicas.

De forma geral, as águas subterrâneas do aquífero siliciclástico tendem a serem cloretadas cálcicas ou cloretadas sódicas, enquanto as águas subterrâneas do aquífero carbonático apresentam-se cloretadas e bicarbonatadas cálcico-sódicas.

Face às considerações apresentadas, verifica-se que a fórmula iônica dominante para o aquífero inferior carbonático é:



O aquífero superior siliciclástico tem a seguinte fórmula iônica predominante:



Percebe-se, então, que as águas do aquífero carbonático mostram-se sensivelmente diferentes das águas do aquífero siliciclástico, na medida em que seus tipos iônicos apresentam maior variação em relação à concentração dos íons. Entretanto, em alguns casos, observam-se evidências de mistura de águas entre essas duas unidades.

Em aquíferos carbonáticos o íon bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) é o principal ânion em solução e o cálcio é o principal cátion. Entretanto, na área estudada observa-se uma tendência de ocorrerem águas cloretadas, contrapondo, de certa forma com o esperado para aquíferos calcários. Tal fato pode estar relacionado à localização do aquífero estudado, que em parte está próximo à linha de costa e sob regime climático semi-árido. Nessa situação, o cloreto torna-se o ânion predominante.

Para uma melhor visualização e análise, os dados foram distribuídos espacialmente sobre as áreas (Figuras 5 a 7) através de diagramas hidroquímicos de *Stiff* (meq/L). A seguir são feitas algumas considerações.

As áreas de Mossoró e Macau as Figuras 5 e 7 evidenciam acréscimo acentuado do íon  $\text{Cl}^-$  e dos principais cátions nas áreas de jusante. Esse aspecto não ocorre de forma progressiva, e sim de forma brusca, a partir de determinados pontos geográficos da área. Este fato pode estar relacionado à influência da intrusão salina natural, que avança na porção continental do aquífero (notadamente nos setores de relevo mais baixo), em sintonia com a baixa taxa de recarga, dadas as condições climáticas desfavoráveis (baixa precipitação anual e concentrada em poucos meses do ano).

Como consequência das limitações de recarga regular do aquífero carbonático, sugere-se que a frente de fluxo de água subterrânea na porção de relevo mais baixo seja incapaz de manter a cunha salina que avança para o continente, e assim, aumentando bruscamente a salinização das águas subterrâneas do aquífero nestes setores mais vulneráveis. Estes aspectos, também são evidenciados no aquífero siliciclástico, notadamente nos poços 9-VBCA-02-RN, 9-VBCA-05-RN e 9-VBSC-03A-RN.

A área de Assú (Figura 6) demonstra condições de águas subterrâneas (no aquífero carbonático) mais associados aos processos de interação água-rocha e/ou água-constituintes do solo. Ainda, é provável que em alguns setores, notadamente na faixa leste, esteja ocorrendo o aporte de águas de escoamento superficial do rio Açu por meio de infiltração vertical descendente a partir do canal do rio e, ainda, o aporte de águas subterrâneas do aquífero aluvial. Essas águas (rio e aquífero aluvial) apresentam características hidroquímicas diferenciadas das águas subterrâneas

carbonáticas, especialmente menor salinidade, podendo influenciar na diluição. Na faixa oeste da área se observa um núcleo de concentração salina elevada que poderia estar associado a uma condição de fluxo lento, provavelmente, devido a menor permeabilidade do aquífero nesse setor.

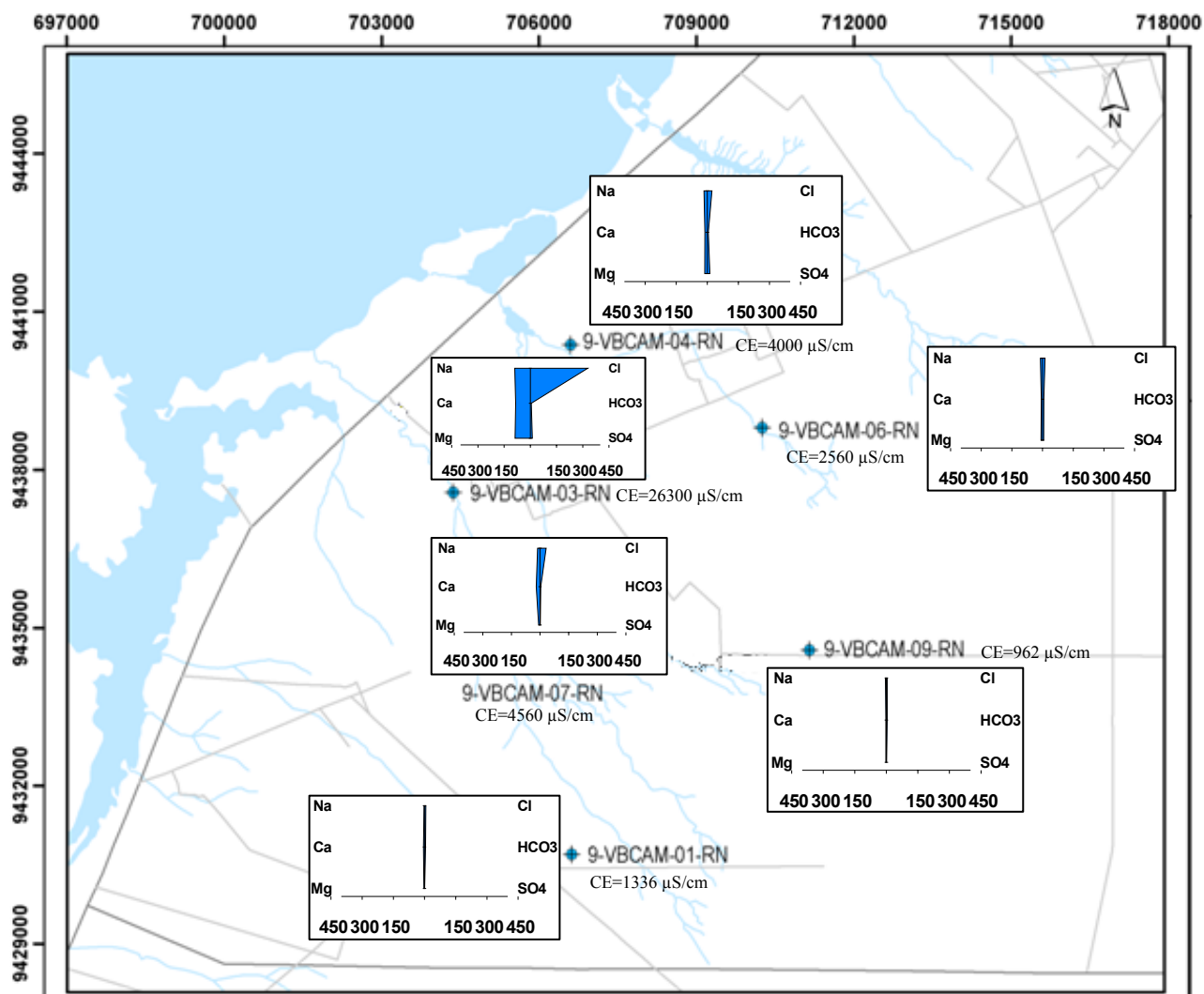


Figura 5. Diagramas de *Stiff* da área de Mossoró e indicação da Condutividade Elétrica (CE,  $\mu\text{S/cm}$ ).

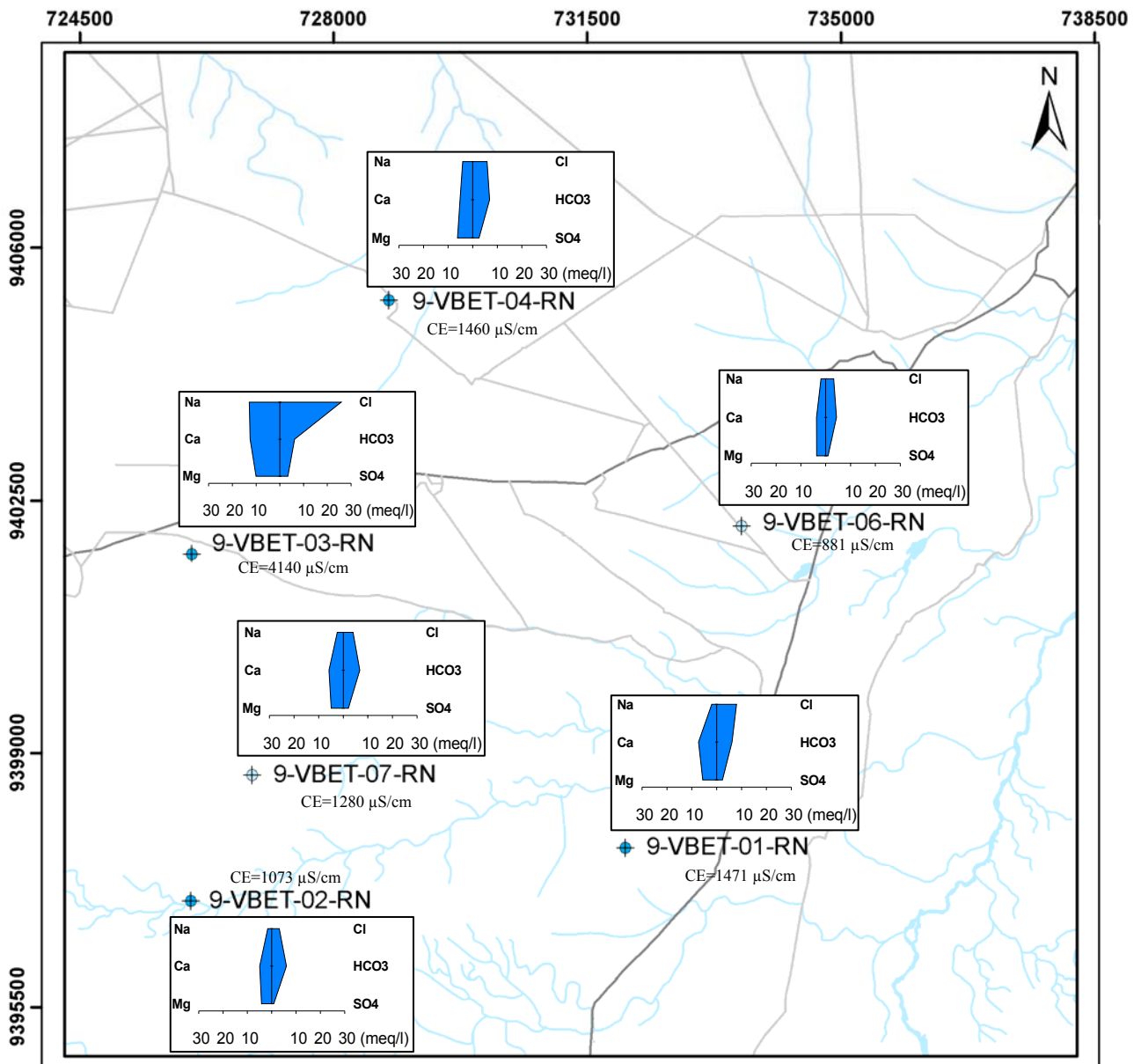


Figura 6. Diagramas de *Stiff* da área de Assú e indicação da Condutividade Elétrica (CE,  $\mu\text{S/cm}$ ).

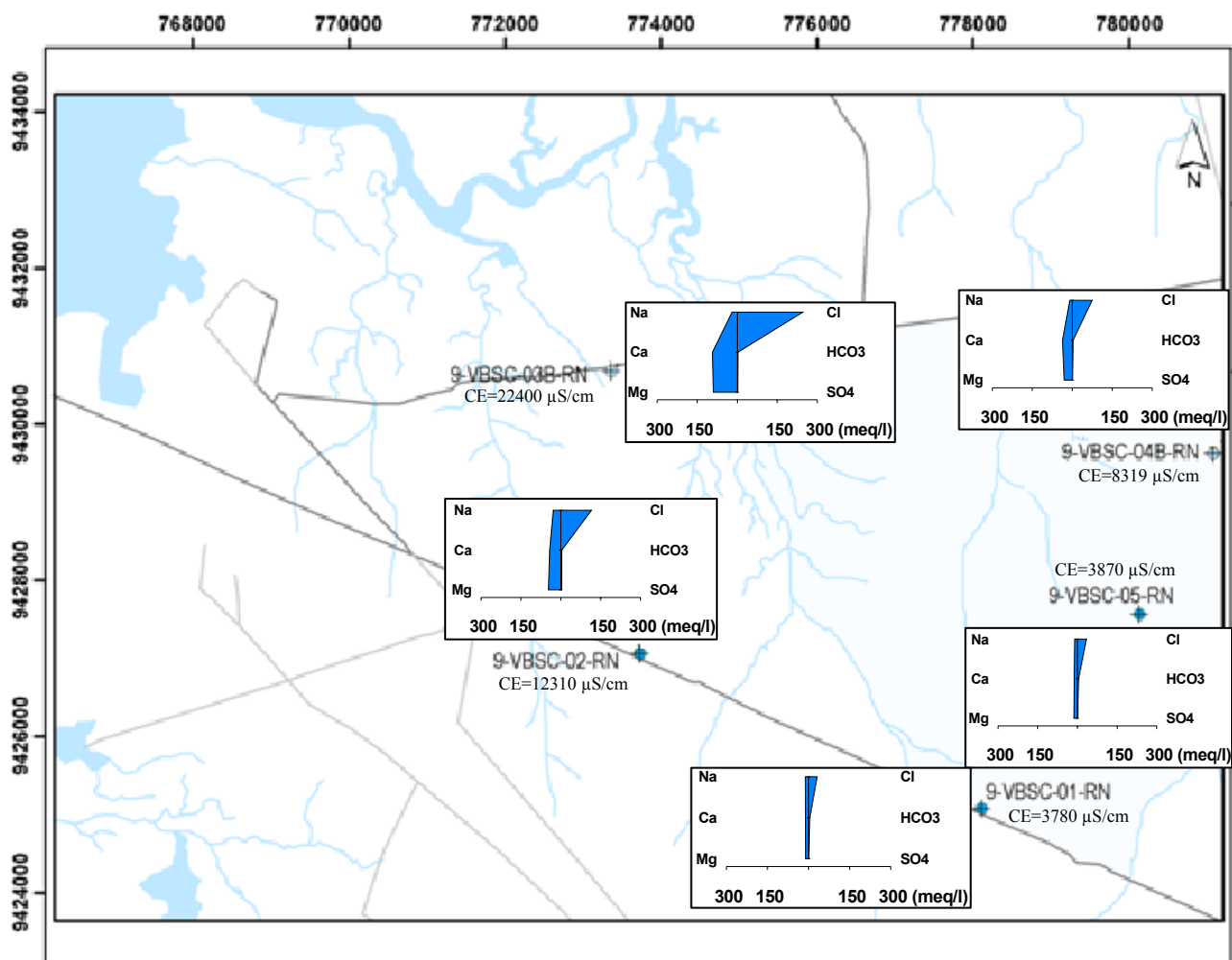


Figura 7. Diagramas de *Stiff* da área de Macau e indicação da Condutividade Elétrica (CE, μS/cm).

## 6. CONCLUSÕES

A principal unidade aquífera rasa nesse setor da Bacia Potiguar corresponde ao aquífero carbonático superior que apresenta ocorrência contínua e espessura saturada espacialmente uniforme. Essa unidade aquífera apresenta um sistema de condutos/canais/cavidades interligados, resultando num padrão regular de escoamento de águas subterrâneas, ligeiramente controlado pelo relevo. Sobreposto, em alguns trechos, ocorre o aquífero siliciclástico que desenvolve espessura saturada apenas em alguns setores, notadamente a jusante do relevo e, dessa forma, constitui preferencialmente uma unidade de recepção e transferência vertical de águas de chuva.

De forma geral, as águas subterrâneas do aquífero siliciclástico tendem a serem cloretadas cálcicas ou cloretadas sódicas, enquanto as águas subterrâneas do aquífero carbonático apresentam-se cloretadas e bicarbonatadas cálcico-sódicas.

O fator climático é o principal responsável pela salinidade elevada observada nas unidades aquíferas inseridas na área. O regime semi-árido é o responsável pelo enriquecimento progressivo

de sais no solo, mediante a baixa taxa de precipitação e alta taxa de evaporação. As chuvas lixiviam os sais acumulados no solo através da zona não saturada, os quais vão progressivamente se acumulando na zona saturada, aumentando a salinidade das águas subterrâneas.

A condutividade elétrica é proporcional à quantidade de íons disponíveis na água, refletindo o seu conteúdo mineral e ótimo indicativo da salinidade das águas. Para o aquífero carbonático a área de Macau apresenta a condutividade elétrica mais elevada dos trechos estudados (média de 10136  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), seguido da área de Mossoró (média de 6620  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) e Assú (média de 1717  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

As áreas de Mossoró e Macau estão localizadas próximo à linha de costa e a presença do aerossol marinho (característico de zonas costeiras), através de sua concentração na água da chuva, pode estar contribuindo para a salinidade elevada dessas águas. Ainda, a salinização nessas áreas pode estar relacionada à influência da intrusão salina natural que avança na porção continental do aquífero, resultante das condições climáticas severas: baixa precipitação anual e concentrada em poucos meses do ano e alta evaporação. Desta forma, a recarga insuficiente induz a uma descarga subterrânea pequena nas frentes de escoamento ao longo da linha de costa, incapaz de evitar o avanço e implantação da cunha salina no interior do continente, notadamente nos setores topograficamente mais baixos. Estes aspectos também são evidenciados no aquífero siliciclástico, notadamente nos poços situados próximo à linha de costa.

No que tange a unidade cárstica carbonática e a complexa dinâmica que governa esse tipo de sistema aquífero, no futuro, outras investigações devem ser feitas considerando um conjunto de fatores que pode variar espacialmente e devem ter influência direta com a salinização dessas águas. Ainda, a análise de isótopos ambientais pode fornecer informações acerca da assinatura geoquímica de cada unidade aquífera inserida, bem como, fornecer subsídios para uma interpretação mais detalhada a respeito da intrusão salina natural evidenciada na área.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- AWWA. 2005. American Water Work Association. Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 21st Edition. 1368 pages.
- Hem, J.D. 2005. Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. Quinta Edição. University Press of the Pacific, Los Angeles. 384 p.
- Hounslow, A.W. 1995. Water quality data: analysis and interpretation. Boca Raton: Lewis Publishers, 1995. 397 p.

Nielsen, D.N., Nielsen, G.L. 2002. Technical Guidance on Low-Flow Purging & Sampling and Minimum-Purge Sampling: Second Edition. The Nielsen Environment Field School. Galé, OH, U.S.A.

Puls, R.W. and Barcelona, M.J. 1996. Low Flow (Minimal Drawdown) Ground Water. Sampling Procedures; US EPA Ground Water Issue, EPAI54O/5-95/504, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, DC, 12 p.