



Revista Brasileira de Agricultura Irrigada v.9, nº.3, p. 145 - 157, 2015  
ISSN 1982-7679 (On-line)  
Fortaleza, CE, INOVAGRI – <http://www.inovagri.org.br>  
DOI: 10.7127/rbai.v9n300300  
Protocolo 300.15 – 07/03/2015 Aprovado em 10/05/2015

## MODELAGEM DA CONCENTRAÇÃO IÔNICA EM ÁGUAS SUPERFICIAIS NA BACIA METROPOLITANA DO CEARÁ

Eldir Bandeira da Silva<sup>1</sup>, José Ribeiro de Araújo Neto<sup>2</sup>, Helba Araújo de Queiroz Palácio<sup>3</sup>,  
Maria Monaliza de Sales<sup>4</sup>, Bruno Eduardo Alves Barros<sup>5</sup>

### RESUMO

Com o objetivo de identificar a relação entre os íons  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{+2}$  e  $\text{Mg}^{+2}$  e a condutividade elétrica (CE) das águas superficiais de reservatórios da bacia metropolitana do Ceará, Brasil, foi desenvolvido e validado modelo de regressão linear simples. Monitorou-se a carga iônica destes íons em sete reservatórios distribuídos na bacia metropolitana do Ceará: Pacajus, Pacoti, Sítios Novos, Aracoiaba, Riachão, Castro e Pompeu Sobrinho. Os dados utilizados foram provenientes do banco de dados da Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará (COGERH) disponibilizados ao Instituto Nacional Científico Tecnológico em Salinidade/UFC–INCTSal e contemplam o período de 1998/2009. As águas dos reservatórios Castro e Pompeu Sobrinho apresentaram uma maior salinidade em decorrência da pressão da cidade de Itapiúna ao açude Castro e devido ao superdimensionamento no Pompeu Sobrinho que dificulta a renovação das águas. Os resultados mostraram que a contribuição de cada íon, tomando por base os coeficientes de correlação R e determinação  $R^2$ , bem como os valores de F, apresentou a seguinte ordem decrescente nos açudes de salinidade baixa:  $\text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{+2} > \text{Ca}^{+2}$  e nos de salinidade alta:  $\text{Mg}^{+2} > \text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{+2}$ . Pelos índices aplicados aos modelos desenvolvidos, os resultados apresentaram coeficiente de correlação (R) e índice de Willmott (id) maiores que 0,80, indicando modelos de desempenho variando de bom a ótimo para as equações propostas ( $c > 0,70$ ). Os modelos apresentaram valores estimados bem próximos dos observados, o que indica uma boa adequabilidade dos modelos propostos.

**Palavras – chave:** regressão linear, reservatórios, qualidade de água.

## MODELING OF ION CONCENTRATION IN SURFACE WATER IN THE METROPOLITAN BASIN OF CEARÁ

<sup>1</sup> Graduando em Tecnologia em Irrigação e Drenagem, Instituto Federal do Ceará - IFCE *campus* Iguatu. Bolsista pesquisador pelo CNPq. E-mail: eldir\_2005@hotmail.com. Tel.: (88) 9 9851 3251;

<sup>2</sup> Doutorando em Engenharia Agrícola, DENA/CCA/UFC. Técnico em laboratório de solos, água e tecidos vegetais, LABAS/IFCE. E-mail: juniorifcelabas@gmail.com;

<sup>3</sup> Doutora em Engenharia Agrícola, DENA/CCA/UFC. Professora no Instituto Federal do Ceará *campus* Iguatu. E-mail: helbaraujo23@yahoo.com.br;

<sup>4</sup> Graduanda em Tecnologia em Irrigação e Drenagem, Instituto Federal do Ceará - IFCE *campus* Iguatu. E-mail: monnallysa2011@hotmail.com;

<sup>5</sup> Graduando em Tecnologia em Irrigação e Drenagem, Instituto Federal do Ceará - IFCE *campus* Iguatu. Bolsista PIBIC/IFCE. E-mail: beduardo@outlook.com.

## ABSTRACT

In order to identify the relationship between the  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  and the electrical conductivity (EC) of surface water reservoirs in the metropolitan basin of Ceará, Brazil, models were developed and validated simple linear regression. Monitored to ionic charge of these ions in seven reservoirs distributed in the metropolitan Ceará basin: Wormleysburg, Packington, New Sites, Aracoiaba, Riachão, Castro and Pompey Nephew. The data used were from the Company's database of Ceará Water Resources Management (COGERH) available to the Scientific and Technological National Institute on Salinity/UFC -INCTSal and include the period 1998/2009. The waters of Castro reservoirs and Pompey Nephew had a higher salinity due to the pressure of the city of Castro Itapiúna the dam and due to oversizing nephew Pompey hindering the renewal of water. The results showed that the contribution of each ion, based on the correlation coefficients  $R$  and  $R^2$  determination and  $F$  values showed the following descending order of the low salinity reservoirs:  $\text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$  and high salt:  $\text{Mg}^{2+} > \text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+}$ . By the indexes applied to models developed, the results showed a correlation coefficient ( $R$ ) and Willmott index ( $d$ ) greater than 0.80, indicating performance models ranging from good to great for the proposed equations ( $c > 0.70$ ). Both models were estimated values very close to the observed, which indicates a good adequacy of the proposed models.

**Keywords:** linear regression, reservoirs, quality water.

## INTRODUÇÃO

O crescimento em larga escala da agricultura irrigada nas regiões secas do globo promoveu a substituição de baixas taxas de evapotranspiração por altas taxas em uma superfície de aproximadamente 110 milhões de hectares, (WICHELNS et al., 2002). Assim como a grande maioria das atividades humanas que geram algum tipo de impacto negativo ao meio ambiente, a irrigação, se não for manejada racionalmente, pode acarretar sérios danos como a salinização do solo, reduzindo a produtividade das culturas sensíveis e, em longo prazo, a desertificação da área (D'ALMEIDA et al., 2005).

Segundo Batista et al.(2006), tal ação resulta em altas concentrações de sais no solo, que muitas vezes vão além da capacidade de suporte do recurso. No entanto, sabem-se que estes sais não são novos, eles já se faziam presentes na bacia na forma de sais dissolvidos nas águas superficiais e subterrâneas. A qualidade da água, o método de irrigação e as

características do solo devem ser analisados conjuntamente, para que se minimizem os riscos de deterioração do solo, em decorrência da adição de sais ao perfil (AYERS & WESTCOT, 1999).

A variável mais empregada para se avaliar a salinidade ou a concentração de sais solúveis na água de irrigação e no solo é a condutividade elétrica (CE), a qual corresponde a medida da capacidade dos íons presentes na água conduzirem eletricidade e que cresce proporcionalmente ao aumento da concentração de sais (RIBEIRO et al., 2005). Vários pesquisadores vem empregando com sucesso análise de regressão linear múltipla na determinação da composição iônica da água, ou seja, teor e proporção de sais presentes na solução e a contribuição de cada íon na condutividade elétrica (BATISTA et al., 2006; D'ALMEIDA et al., 2005; MAIA et al., 2001; RODRIGUES et al., 2007; ARAÚJO NETO et al. (2010)).

Diante o exposto, este trabalho objetivou identificar a relação entre os íons  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e

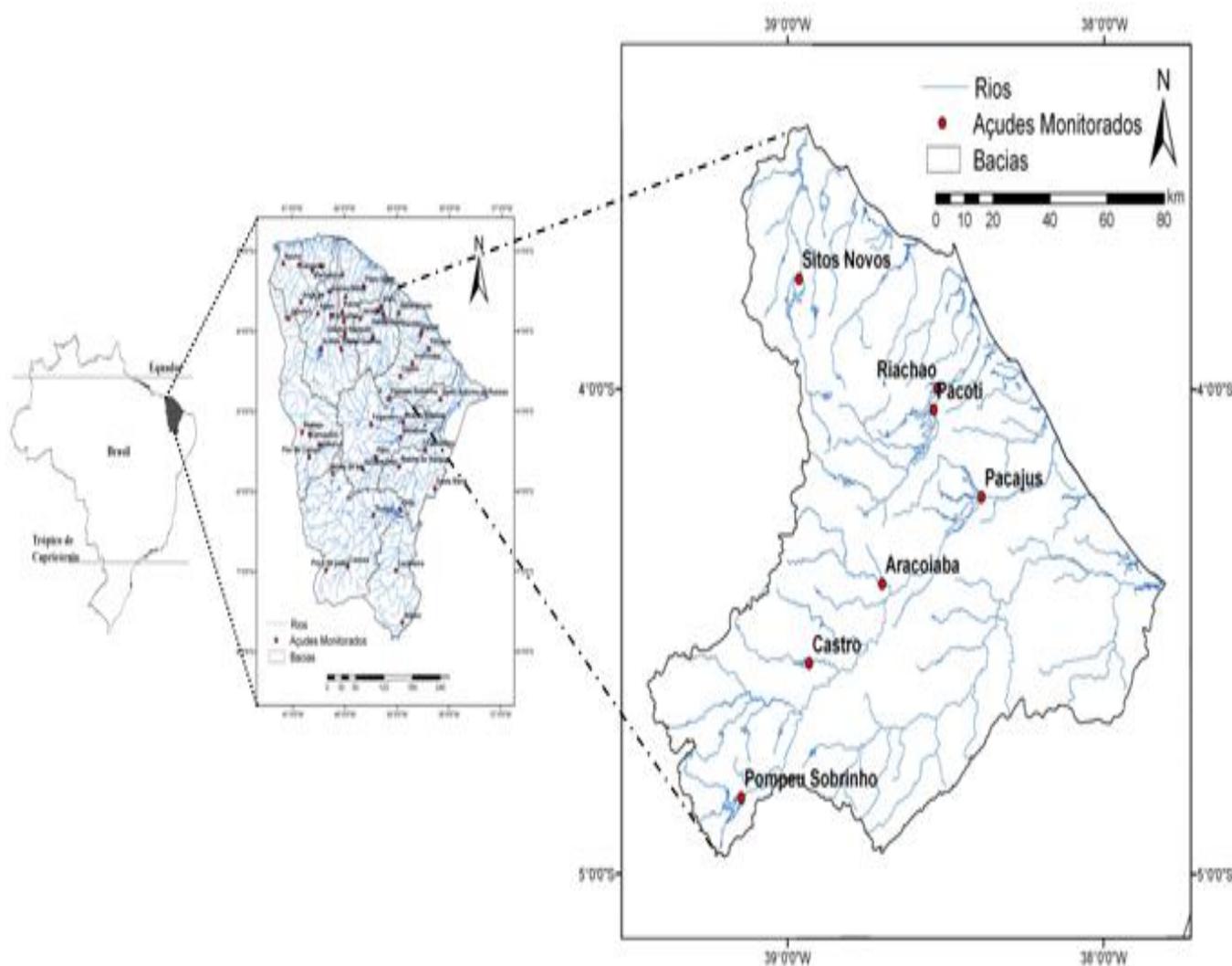
## MODELAGEM DA CONCENTRAÇÃO IÔNICA EM ÁGUAS SUPERFICIAIS NA BACIA METROPOLITANA DO CEARÁ

$Mg^{2+}$  e a condutividade elétrica (CE) das águas superficiais de reservatórios da bacia metropolitana do Ceará, Brasil, por meio da calibração e validação de modelo de regressão linear simples.

### MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho consistiu no estudo da salinidade das águas dos reservatórios das bacias hidrográficas Metropolitanas do Ceará, situada na região norte do Estado. A bacia apresenta área de 15.085 km<sup>2</sup> e engloba um conjunto de bacias independentes, incluindo as bacias responsáveis pelo sistema de abastecimento de água de

Fortaleza. O presente estudo foi desenvolvido utilizando dados provenientes do banco de dados da Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará (COGERH), disponibilizados ao Instituto Nacional Científico Tecnológico em Salinidade/UFC - INCTSal, entre os anos de 1998 a 2009. Os parâmetros avaliados foram: condutividade elétrica (CE), os íons sódio ( $Na^+$ ), cloreto ( $Cl^-$ ), cálcio ( $Ca^{2+}$ ) e Magnésio ( $Mg^{2+}$ ), com um total de 372 amostras, coletadas de 7 reservatórios monitorados da bacia metropolitana do Ceará (Figura 1). Os reservatórios estudados foram: Pacajus, Pacoti, Sítios Novos, Aracoiaba, Riachão, Castro e Pompeu Sobrinho (Tabela 1).



**Figura 1** – Localização dos reservatórios estudados na bacia Metropolitana do Ceará, Brasil.

**Tabela 1** -Características dos reservatórios estudados na Bacia Metropolitana do Ceará, Brasil

Reservatório	Capacidade (m <sup>3</sup> )	Localização	Coordenadas	Altitude (m)	Precipitação Anual (mm)	T <sub>min</sub> - T <sub>max</sub> (°C)
Pacajus	240 milhões	Pacajus e Chorozinho	E: 562.948 N: 9.531.995	100	1057	22 - 34
Pacoti	370 milhões	Horizonte e Itaitinga	E: 548.283 N: 9.548.002	85	1137	24 - 32
Sítios Novos	126 milhões	Caucaia	E: 504.706 N: 9.583.427	29	1216	26 - 29
Aracoiaba	170 milhões	Aracoiaba	E: 529.926 N: 9.515.186	86	1058	21 - 35
Riachão	46 milhões	Itaitinga	E: 553.073 N: 9.557.737	67	1216	24 - 32
Castro	64 milhões	Itapiúna	E: 504.160 N: 9.495.633	132	805	21 - 35
Pompeu Sobrinho	143 milhões	Choró	E: 484.328 N: 9.465.204	228	748	21 - 36

A temperatura média da bacia Metropolitana varia de 25,7 a 27,34°C em Fortaleza e de 19,2 a 21,2°C em Guaramiranga. Na porção ocidental da região, as condições climáticas são mais secas, a precipitação média oscila em torno de 900 a 1.200 mm.ano<sup>-1</sup>, com temperaturas mais elevadas, em torno de 33° a 34°C média das máximas. Uma das principais características do clima regional diz respeito à favorável insolação, o número médio de horas de insolação na área, está entre 1.903,4 horas.ano<sup>-1</sup> em Guaramiranga e 2.694,3 horas.ano<sup>-1</sup> em Fortaleza (FUNCEME, 2002). Os ventos predominantes são os Alísios de sudeste que sopram com mais intensidade no período não chuvoso. A compartimentação do relevo é representada pelas unidades geomorfológicas; Planície-litorânea, Tabuleiros pré-litorâneos; Planícies fluviais; Depressão sertaneja e Maciços residuais (FUNCEME, 2002).

Para separar os reservatórios em dois grupos distintos de alta e baixa salinidade, baseando nas concentrações de sais dos íons analisados, os dados das concentrações químicas dos respectivos foram submetidos a uma análise

de variância (ANOVA) ao nível de 1% de significância. Após separados os grupos de reservatórios de alta e baixa salinidade foi aplicada a técnica de estatística regressão linear simples para definir os íons que apresentavam maior correlação com a CE. O presente trabalho se dividiu em duas etapas, uma primeira, com resultado das análises referentes aos íons (Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e Cl<sup>-</sup>) e a CE (condutividade elétrica da água), no período de 1998 a 2005, calibraram-se para cada íon as equação de regressão linear simples através do software SPSS v.16 de acordo com a seguinte expressão:

$$Y = a + b \times CE \quad (1)$$

Em que Y, variável dependente, expressa a concentração do íon; CE, variável independente, representa a condutividade elétrica; e “a” e “b” são os coeficientes da equação. Na segunda etapa foi feita a validação dos modelos empregando-se dados referentes aos reservatórios no período de 2006 a 2009, evitando com isso falhas promovidas pela auto correlação dos dados, uma vez que o modelo foi

## MODELAGEM DA CONCENTRAÇÃO IÔNICA EM ÁGUAS SUPERFICIAIS NA BACIA METROPOLITANA DO CEARÁ

validado com dados não empregados na sua calibração. Esta mesma metodologia foi empregada por Arraes *et al.* (2007) em modelagem da concentração de íons na águas superficiais da bacia do Curu.

Para se avaliar o desempenho das equações de regressão, a qual compunha a segunda fase da modelagem, foram aplicados os seguintes índices estatísticos: coeficiente de correlação (R), o qual indica a dispersão dos dados em relação à média (precisão) e o índice de Willmott (id) que indica o grau de exatidão do modelo, ou seja, de quanto os valores estimados se aproximam dos observados. Os coeficientes de correlação (R) e determinação ( $r^2$ ) de Pearson podem ser interpretados segundo os limites apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2-** Interpretação dos coeficientes de correlação e determinação de Pearson

Escala de Pearson		
Fraca	Moderada	Forte
$0 \leq R^2 \leq 0,25$	$0,25 \leq R^2 \leq 0,81$	$0,81 \leq R^2 \leq 1$
$0 \leq R \leq 0,50$	$0,50 \leq R \leq 0,90$	$0,90 \leq R \leq 1$

Adaptado Milton (1992)

O índice de Willmott (id) foi calculado com base na Eq. 3. O índice de concordância proposto por Willmott (1981) assume valores que variam de zero, para nenhuma concordância, a 1,0, para concordância perfeita entre eles.

$$id = 1 - \frac{\sum (x_i - y_i)^2}{\sum (|x_i - \bar{y}|)^2 + (|y_i - \bar{y}|)^2} \quad (3)$$

Em que:

id - é o índice de concordância de Willmott, adimensional;

$x_i$  - expressa o valor estimado da variável;

$y_i$  - representa o valor observado, e

$\bar{y}$  - corresponde à média dos valores observados.

Por último empregou-se o índice de confiança ou desempenho (c), o qual é o produto do coeficiente de correlação com o índice de

Willmott ( $c = R * id$ ), em que  $c = 1$  significa confiança perfeita e  $c = 0$  considerado péssimo (Tabela 3), conforme proposto por Camargo & Sentelha (1997).

**Tabela 3** - Valores do coeficiente de desempenho conforme Camargo e Sentelhas (1997)

Valor de "c"	Desempenho
> 0,90	Ótimo
0,81 a 0,90	Muito Bom
0,71 a 0,80	Bom
0,51 a 0,70	Mediano
0,41 a 0,50	Sofrível
0,31 a 0,40	Mau
$\leq 0,30$	Péssimo

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### Variação Espacial

A condutividade elétrica da água dos reservatórios da bacia Metropolitana apresentou variações com valores médios mínimos de 0,51 dS  $m^{-1}$  e máximo de 2,15 dS  $m^{-1}$  para os reservatórios Pacoti e Pompeu Sobrinho, respectivamente (Tabela 4), variando quanto a restrição para uso na irrigação de nenhum risco a moderado risco de causar salinidade aos solos segundo a classificação de Ayers e Westcot (1999). Observa-se notadamente dois grupos formados, em função da diferença estatística significativa ao nível de 1% de significância entre todos os parâmetros estudados  $CE$ ,  $Cl^-$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$ . Os valores médios da  $CE$  e dos íons estudados nos açudes Pacajus, Pacoti, Sítios Novos, Aracoiaba e Riachão foram sempre menores comparando-se com os valores médios

dos açudes Castro e Pompeu Sobrinho, que apresentaram maiores níveis de salinidade.

O primeiro grupo de reservatórios é formado pelos açudes de baixa salinidade, sendo composto pelos açudes Pacajus, Sítios Novos, Riachão, Pacoti e Aracoiaba, que apresentaram todos os parâmetros estudados: condutividade elétrica, os íons sódio, cloreto, cálcio e Magnésio diferindo estatisticamente, ao nível de 5% de significância, dos demais reservatórios. Esses reservatórios apresentaram valores médios de

CE abaixo do limite de  $0,70 \text{ dS m}^{-1}$  estabelecido por Ayers e Westcot (1999) para águas sem nenhuma restrição de uso quanto à salinidade para a agricultura irrigada. O segundo grupo de reservatórios é composto pelos açudes Castro e Pompeu Sobrinho, que apresentaram elevadas concentrações de sais, com valores médios de CE enquadrando-se na classe de moderada a alta restrição de uso quanto aos limites estabelecidos por Ayers e Westcot (1999) para uso na irrigação.

**Tabela 4** - Valores médios das variáveis em estudos para os reservatórios da bacia metropolitana do Ceará

Açudes	Estatística	CE ( $\text{dS m}^{-1}$ )	Cl <sup>-</sup> ( $\text{mmol}_c \text{ L}^{-1}$ )	Na <sup>+</sup> ( $\text{mmol}_c \text{ L}^{-1}$ )	Ca <sup>2+</sup> ( $\text{mmol}_c \text{ L}^{-1}$ )	Mg <sup>2+</sup> ( $\text{mmol}_c \text{ L}^{-1}$ )
Pacajus	Média ± D. P.	<b>0,66 ± 0,18</b> a	<b>5,08 ± 1,07</b> a	<b>3,48 ± 1,30</b> a	<b>1,24 ± 0,29</b> a	<b>1,44 ± 0,77</b> a
	Mínimo	0,33	2,37	0,47	0,56	0,26
	Máximo	1,15	9,42	9,29	1,93	3,15
Pacoti	Média ± D. P.	<b>0,51 ± 0,14</b> a	<b>3,67 ± 1,21</b> a	<b>2,79 ± 0,94</b> a	<b>0,78 ± 0,26</b> a	<b>1,52 ± 0,58</b> a
	Mínimo	0,25	1,69	0,84	0,34	0,44
	Máximo	0,94	6,36	5,12	1,4	3,31
Sítios Novos	Média ± D. P.	<b>0,52 ± 0,18</b> a	<b>3,44 ± 2,11</b> a	<b>2,92 ± 2,05</b> a	<b>0,90 ± 0,19</b> a	<b>1,56 ± 0,42</b> a
	Mínimo	0,23	0,84	0,40	0,20	0,67
	Máximo	1,71	18,6	17,11	1,28	2,93
Aracoiaba	Média ± D. P.	<b>0,56 ± 0,32</b> a	<b>4,59 ± 3,71</b> a	<b>2,52 ± 0,98</b> a	<b>0,93 ± 0,19</b> a	<b>1,48 ± 0,16</b> a
	Mínimo	0,28	2,99	0,62	0,52	1,18
	Máximo	1,47	15,69	4,69	1,18	1,75
Riachão	Média ± D. P.	<b>0,51 ± 0,13</b> a	<b>3,74 ± 1,27</b> a	<b>2,84 ± 1,04</b> a	<b>0,80 ± 0,30</b> a	<b>1,54 ± 0,50</b> a
	Mínimo	0,24	1,69	1,06	0,20	0,72
	Máximo	0,99	8,31	7,05	1,67	2,77
Castro	Média ± D. P.	<b>1,07 ± 0,31</b> b	<b>9,10 ± 2,90</b> b	<b>5,79 ± 2,42</b> b	<b>2,00 ± 0,47</b> b	<b>3,37 ± 0,77</b> b
	Mínimo	0,58	2,68	2,96	1,78	1,7
	Máximo	1,86	17,52	13,95	4,48	5,38
Pompeu Sobrinho	Média ± D. P.	<b>2,15 ± 1,11</b> c	<b>21,61 ± 10,08</b> c	<b>10,47 ± 5</b> c	<b>2,48 ± 0,80</b> b	<b>5,66 ± 2,57</b> c
	Mínimo	0,69	0,23	4,64	1,78	2,57
	Máximo	4,19	44,91	21,79	4,48	12,33

\* Médias seguidas de letras minúsculas diferentes diferem entre si na coluna pelo teste de F a nível de 1% de significância.

O Cloreto ( $\text{Cl}^-$ ), em todos os reservatórios, tanto do primeiro grupo de reservatórios como no segundo, apresentou valores acima do índice estabelecido por Ayers e Wescot (1999), no qual o limite para alta restrição para fins de irrigação é de  $3 \text{ mmol}_c \cdot \text{L}^{-1}$ , com destaque para os açudes Castro ( $\text{Cl}^- = 9,1 \text{ mmol}_c \cdot \text{L}^{-1}$ ) e Pompeu Sobrinho ( $\text{Cl}^- = 21,61 \text{ mmol}_c \cdot \text{L}^{-1}$ ), que apresentaram valores superiores ao limite de severo risco de toxidez ( $9 \text{ mmol}_c \cdot \text{L}^{-1}$ ).

O íon Sódio ( $\text{Na}^+$ ) nos reservatórios de maiores salinidades do segundo grupo (Castro e Pompeu Sobrinho) mostrou um elevado grau de restrição para o uso na irrigação, tendo em vista que o seu limite máximo também é  $3 \text{ mmol}_c \cdot \text{L}^{-1}$ . Porém os valores de  $\text{Na}^+$  para o primeiro grupo de reservatórios, com exceção do reservatório Pacajus, que também ultrapassou o limite máximo estabelecido, estiveram dentro do padrão de normalidade para fins de irrigação. Baixas concentrações de  $\text{Na}^+$  em águas superficiais em regiões semiáridas, apresentando dentro dos padrões para uso na irrigação, também foram encontradas em outras regiões como no rio Songhua, China (ZHANG et al., 2012) nos rios Oyan e Ogun, Nigéria (AKINYEMI; SOULEY, 2014) e em águas superficiais do Ceará, Brasil (ARRAES et al., 2009; LOPES et al., 2014).

Essas maiores concentrações de sais verificadas para o reservatório Castro que pertence ao grupo de reservatórios de altas salinidades, podem ser relacionadas à pressão da cidade de Itapiúna ao açude Castro aliado às águas novas nas primeiras coletas, pois o reservatório foi concluído em 1997, pouco tempo antes do início do monitoramento. Já para o açude Pompeu Sobrinho, que também pertence ao mesmo grupo, as elevadas concentrações dos sais devem estar associadas ao superdimensionamento do açude, que ocasiona longos

períodos sem renovação das águas por extravasamento do reservatório, sendo a última sangria ocorrida em 1974, agravando, assim, o processo de acumulação de sais ao longo do tempo proporcionado pela evaporação (PALÁCIO et al., 2011).

Ainda na Tabela 4, observa-se que todos os valores para  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , com exceção do açude Pompeu Sobrinho em relação ao íon  $\text{Mg}^{2+}$  ( $5,66 \text{ mmol}_c \cdot \text{L}^{-1}$ ) apresentaram baixo grau de restrição, segundo as recomendações dadas por Ayers e Wescot (1999) que apresentam o limite máximo destes elementos para fins de irrigação em  $5 \text{ mmol}_c \cdot \text{L}^{-1}$ . Valores aceitáveis de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  para uso na irrigação em águas superficiais em regiões semiáridas também foram verificados por Lopes et al. (2014) e Akinyemie Souley (2014). Quantidades adequadas de magnésio favorecem a atividade enzimática dos tecidos vegetais das plantas, entretanto, quando em excesso, provoca uma baixa na produtividade. Segundo Ayers e Wescot (1999), teores adequados de cálcio diminuem os efeitos tóxicos do  $\text{Na}^+$  e  $\text{Mg}^{2+}$  quando absorvidos pela planta, entretanto, em teores elevados, podem causar dureza a água, corroborando para incrustações nas paredes das tubulações.

### Desenvolvimento dos Modelos

No desenvolvimento de modelos de regressão linear, para estimativa dos íons  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  em função da CE nas águas superficiais da Bacia Metropolitana do Estado do Ceará, os reservatórios estudados foram divididos em grupos de alta e baixa salinidade, de acordo com as concentrações médias anteriormente observadas da CE e dos íons monitorados na Tabela 4. Assim foram desenvolvidos modelos para estimativa dos íons em função da CE para um grupo de reservatórios

de baixa salinidade e outro grupo de reservatórios de alta salinidade.

Os modelos desenvolvidos mostram que a dependência entre os íons  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  e a CE das águas pode ser estimada com

elevado grau de confiabilidade, tanto para o grupo de reservatórios de baixa salinidade, como para o grupo de altas salinidades, baseado não somente nos coeficientes de determinação  $R^2$ , mas também nos valores de F (Tabela 5).

**Tabela 5** – Regressão simples, coeficiente de correlação, coeficiente de determinação, valores do teste F e Sig para os grupos de baixa e alta salinidade da Bacia Metropolitana

Açudes	Relação	Equações	R	R <sup>2</sup>	F	Sig.	Limites
Baixa	CExCl <sup>-</sup>	$y = 8,1459x + 0,0249$	0,9009	0,8117	353,4	0,000	$0,23 \leq CE \leq 1,71$
	CExNa <sup>+</sup>	$y = 6,4005x - 0,3986$	0,8632	0,7452	257,3	0,000	
	CExCa <sup>2+</sup>	$y = 1,8649x - 0,0981$	0,7788	0,6065	168,0	0,000	
	CExMg <sup>2+</sup>	$y = 3,0941x - 0,0214$	0,8372	0,7009	189,8	0,000	
Alta	CExCl <sup>-</sup>	$y = 8,77x + 0,3831$	0,8965	0,8038	98,3	0,000	$0,58 \leq CE \leq 4,19$
	CExNa <sup>+</sup>	$y = 5,2261x + 0,6276$	0,8887	0,7898	90,2	0,000	
	CExCa <sup>2+</sup>	$y = 1,451x + 0,5157$	0,8872	0,7871	99,8	0,000	
	CExMg <sup>2+</sup>	$y = 3,4216x + 0,1438$	0,9747	0,9501	476,0	0,000	

Os resultados das análises de regressão simples evidenciam mudanças no valor do coeficiente de determinação ( $r^2$ ) dos modelos desenvolvidos, expressando uma maior correlação entre a condutividade elétrica (CE) e os íons  $\text{Cl}^-$  e  $\text{Na}^+$  para os reservatórios de baixa salinidade. Já para os reservatórios de alta salinidade as maiores correlações observadas foram para os íons  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{Cl}^-$ .

Tomando por base os coeficientes de correlação R e determinação  $r^2$ , bem como os valores de F, as correlações dos íons com a CE das águas superficiais da bacia metropolitana obedeceram a seguinte ordem decrescente nos

açudes de salinidade baixa:  $\text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$  e salinidade alta:  $\text{Mg}^{2+} > \text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+}$ . Observa-se através dos coeficientes de correlação variando entre 0,77 e 0,97; coeficiente de determinação variando entre 0,60 e 0,95 e valores de F sempre superiores a 90, que os íons estudados podem ser estimados com moderado a elevado grau de confiabilidade a partir da condutividade elétrica das águas superficiais. Pelos valores de F, a um nível de significância de 1%, a hipótese de que a variação dos elementos estudados não pode ser explicada por um modelo linear, foi rejeitada. Resultados semelhantes foram obtidos por Andrade et

## MODELAGEM DA CONCENTRAÇÃO IÔNICA EM ÁGUAS SUPERFICIAIS NA BACIA METROPOLITANA DO CEARÁ

al.(2004), em estudo sobre modelagem de íons no Rio Trussu, em Iguatu-CE e por Rodrigues et al. (2007) em estudos nas águas subterrâneas no distrito de irrigação Baixo Acaraú, Ceará.

Ainda na Tabela 5 verifica-se que a estimativa dos íons  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  nos açudes de baixa concentração de sais apresentaram moderado grau de confiabilidade, segundo a Escala de Pearson (Milton, 1992), em que o coeficiente de determinação ( $r^2$ ) variou de 0,6 a 0,7. Já nos açudes em que a concentração salina foi um pouco mais elevada o coeficiente variou de 0,78 a 0,95, no qual o pico se deu no íon  $\text{Mg}^{2+}$ , resultados que aumentam o grau de confiabilidade na estimativa dos íons através da CE.

### Validação dos Modelos

Os modelos de regressão linear simples propostos para a estimativa das concentrações dos íons  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  nas águas superficiais da bacia Metropolitana do Estado do Ceará, apresentaram-se adequados (Tabela 6).

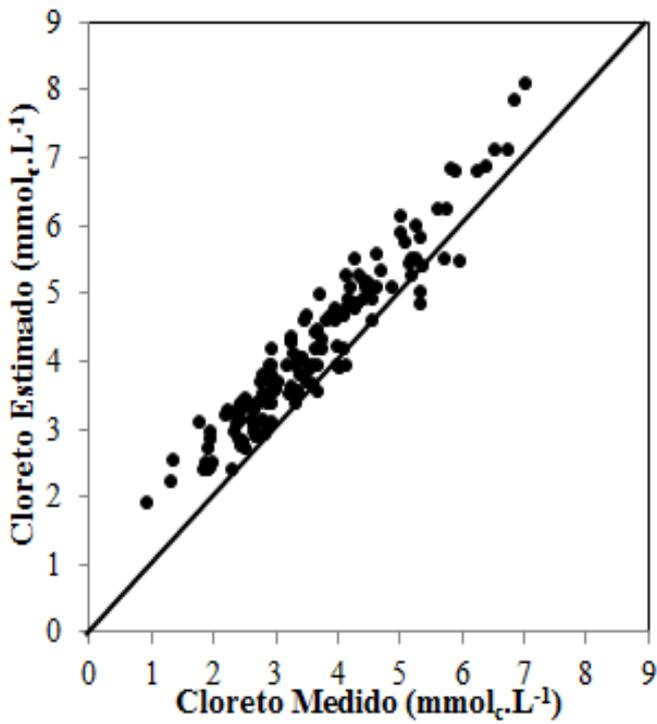
Observando a variância dos valores do Índice de Willmott (id), Coeficiente de Correlação (R) e Coeficiente de Desempenho (c) (id = 0,90 a 0,99; R = 0,78 a 0,97; c = 0,71 a 0,94), verifica-se que os modelos desenvolvidos mostraram-se com um grau de confiabilidade entre bom a ótimo, indicando que as concentrações das águas superficiais da bacia Metropolitana, tanto para altas como baixas salinidades, podem ser estimadas pelos modelos. Resultados semelhantes foram encontrados em diversas regiões do Estado do Ceará por Rodrigues et al. (2007) para águas subterrâneas na bacia do Acaraú, por Santos et al. (2009) para águas superficiais do rio Acaraú, por Andrade et al. (2004) no trecho perenizado do rio Trussu, por Arraes et al. (2007) nas águas superficiais da

bacia do Curu, e por Araújo Neto et al. (2010) no reservatório Orós na bacia do Alto Jaguaribe.

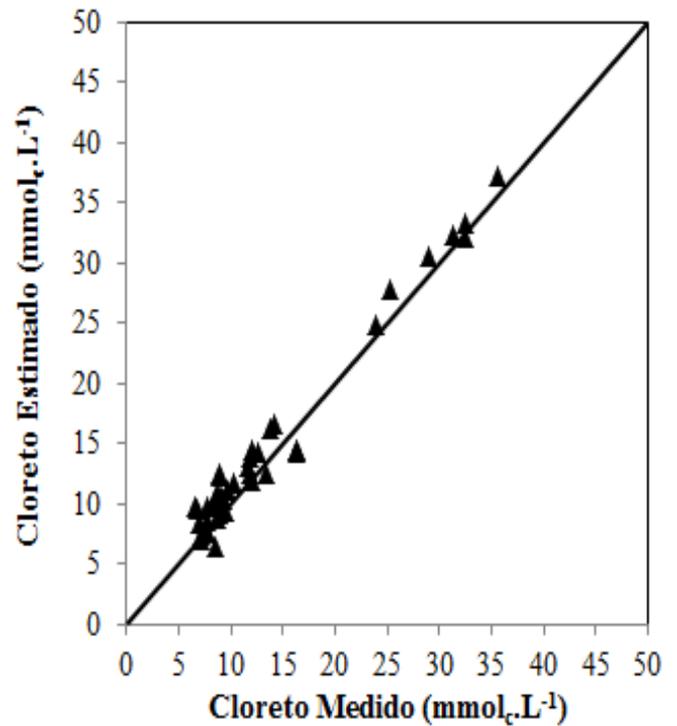
**Tabela 6** – Valores do coeficiente de correlação, índice de Willmott e coeficiente de desempenho para as partes de baixa e alta salinidade da Bacia Metropolitana.

Açudes	Relação	R	Id	C	Classificação
Salinidade Baixa	CExCl	0,96	0,93	0,89	Muito Bom
	CExNa	0,86	0,99	0,85	Muito Bom
	CExCa	0,78	0,92	0,71	Bom
	CExMg	0,84	0,92	0,77	Bom
Salinidade Alta	CExCl	0,90	0,99	0,89	Muito Bom
	CExNa	0,89	0,94	0,84	Muito Bom
	CExCa	0,89	0,90	0,80	Muito Bom
	CExMg	0,97	0,97	0,94	Ótimo

Nas Figuras 2, 3, 4 e 5 são apresentados o grau de relacionamento entre as concentrações medidas e as estimadas a partir dos modelos desenvolvidos para, respectivamente, os íons  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  nos grupos de alta salinidade (Figuras 2A, 3A, 4A e 5A) e baixa salinidade (Figuras 2B, 3B, 4B e 5B). Essa comparação é de extrema importância para fornecer suporte para a avaliação da acuracidade do modelo de estimativa. Um grau de relacionamento perfeito é encontrado sempre quando os pares de pontos (estimados e medidos) coincidem com a reta 1:1. Nessa situação têm-se os valores simulados pelo modelo exatamente iguais aos observados em laboratório representando uma condição teórica.

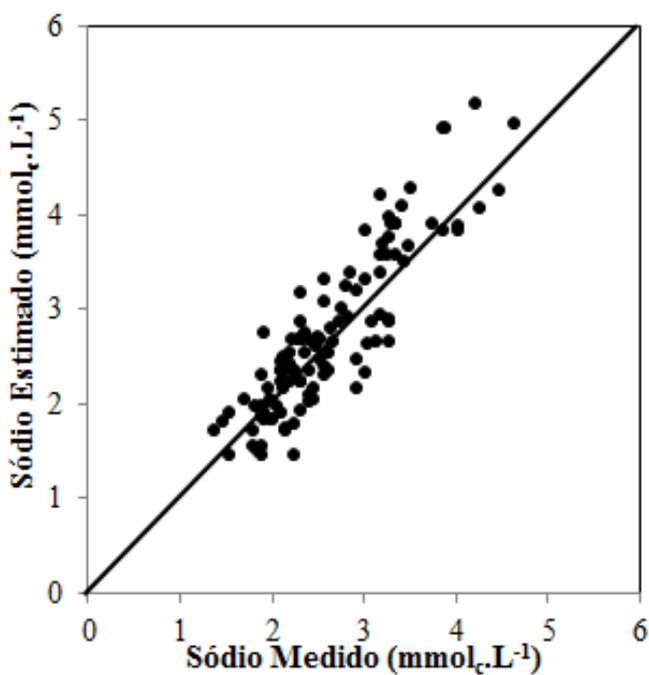


(A)

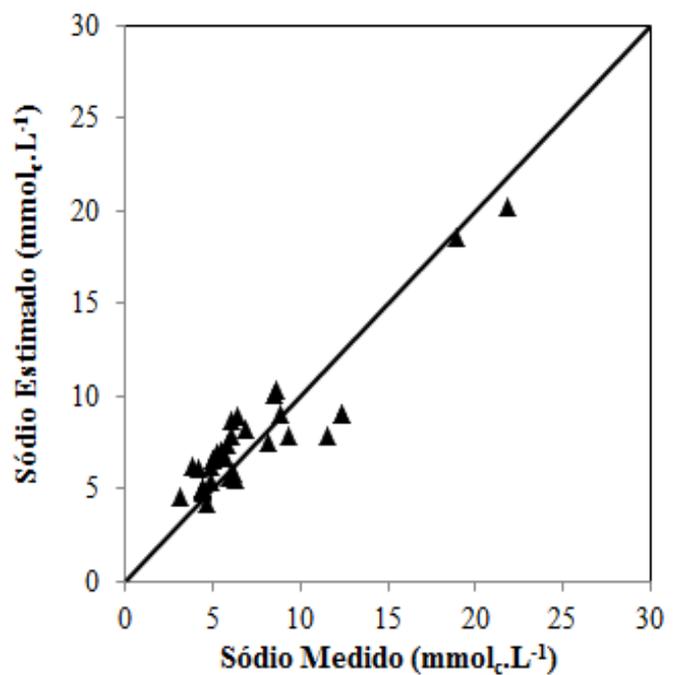


(B)

**Figura 2** – Relação entre o íon  $\text{Cl}^-$  estimado e medido nas partes de baixa (A) e alta (B) salinidade das águas superficiais da Bacia Metropolitana.



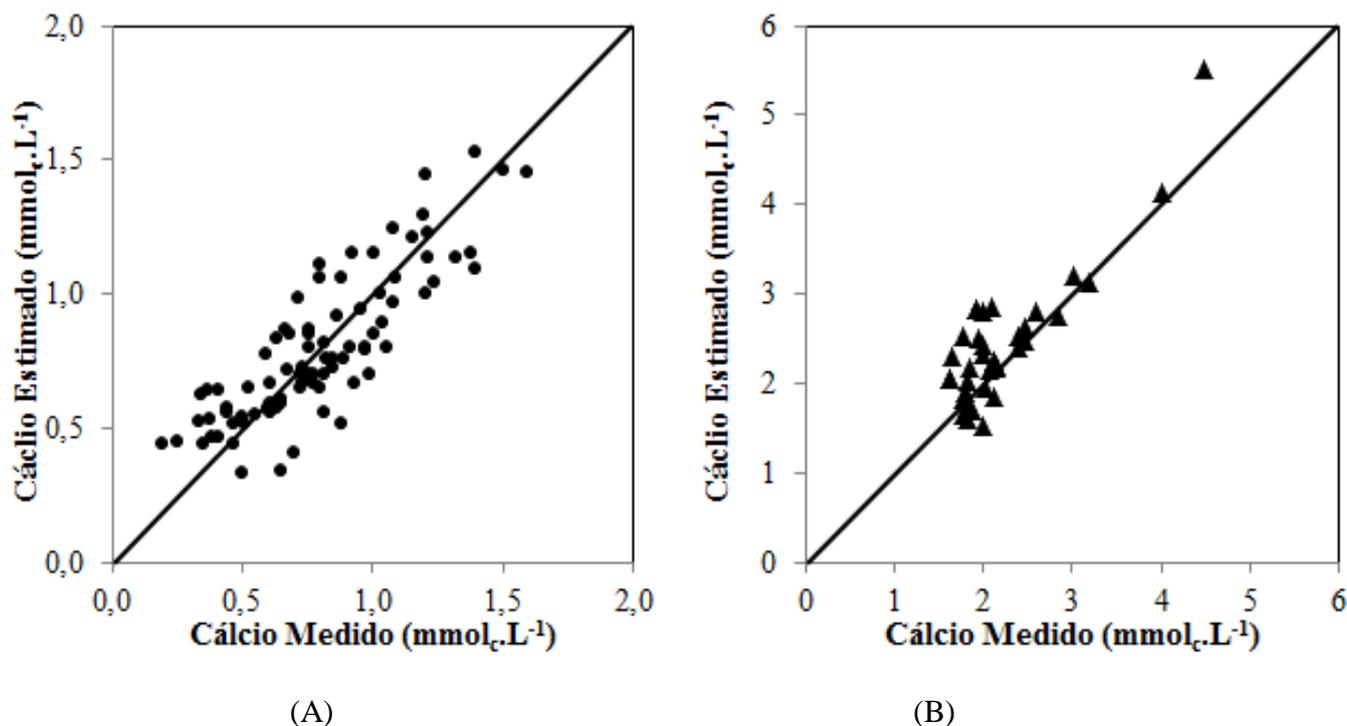
(A)



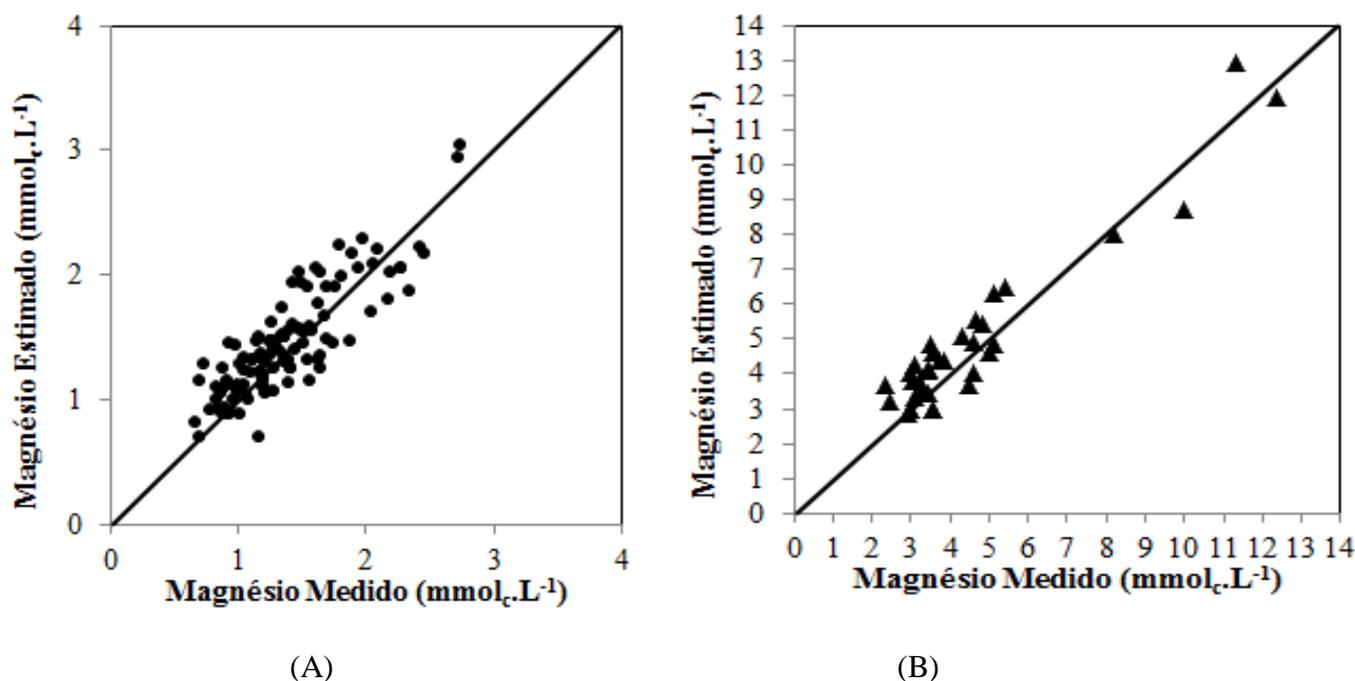
(B)

**Figura 3** – Relação entre o íon  $\text{Na}^+$  estimado e medido nas partes de baixa (A) e alta (B) salinidade das águas superficiais da Bacia Metropolitana.

MODELAGEM DA CONCENTRAÇÃO IÔNICA EM ÁGUAS SUPERFICIAIS NA BACIA METROPOLITANA DO CEARÁ



**Figura 4** – Relação entre o íon Ca<sup>2+</sup> estimado e medido nas partes de baixa (A) e alta (B) salinidade das águas superficiais da Bacia Metropolitana



**Figura 5** – Relação entre o íon Mg<sup>2+</sup> estimado e medido nas partes de baixa (A) e alta (B) salinidade das águas superficiais da Bacia Metropolitana

### CONCLUSÕES

- As concentrações dos íons analisados geraram dois grupos distintos entre os reservatórios da bacia metropolitana do

Ceará, o primeiro composto por reservatórios de baixa salinidade: Pacajus, Pacoti, Sítios Novos, Aracoiaba e Riachão e o segundo formado por reservatórios de alta salinidade: Castro e Pompeu Sobrinho.

- A contribuição de cada íon na CE, tomando por base os coeficientes de correlação R e determinação  $r^2$ , bem como os valores de F, apresentaram a seguinte ordem decrescente nos reservatórios de salinidade baixa:  $Cl^- > Na^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+}$  e de salinidade alta:  $Mg^{2+} > Cl^- > Na^+ > Ca^{2+}$ ;
- Os modelos desenvolvidos para estimar os íons das águas dos reservatórios a partir da CE apresentaram uma boa adequação, segundo o coeficiente de correlação (R) e o índice de Willmott (id)

### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará - COGERH, ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Salinidade – INCTSal, e ao CNPq pelo apoio financeiro ao desenvolvimento desta pesquisa.

### REFERÊNCIAS

- AKINYEMIA J. O., SOULEYBS. O. Monitoring the Quality of Some Sources of Irrigation Water in Different Parts of Ogun State, Nigeria. **IERI Procedia**, v. 9, p. 123 – 128, 2014.
- ANDRADE, E. M.; PALÁCIO, H. A. Q.; SOUZA, I. H. de.; CRISÓSTOMO, L. A. Modelagem da concentração de íons nas águas do vale perenizado do rio Trussu, Iguatu-CE. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 7., 2004, São Luís. **Anais...** Porto Alegre: ABRH. 1 CD.
- ARAÚJO NETO, J. R.; ANDRADE, E. M.; MEIRELES, A. C. M. ; SANTOS, J. C. N.; BATISTA, A. A. Modelagem das características físicas nas águas superficiais do açude Orós. In: IX Congreso Latino americano y del Caribe de Ingeniería Agrícola - CLIA 2010 & XXXIX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2010, Vitória- ES, **Anais...** IX CLIA 2010 & XXXIX CONBEA, 2010.
- ARRAES, F. D. D.; PALÁCIO, H. A. Q.; ANDRADE, E. M.; SILVA, J. A.; FROTA JUNIOR, J. I. Modelagem da concentração de íons nas águas superficiais da Bacia do Curu. In: XXXVI Congresso de Engenharia Agrícola, 2007, Bonito. **Anais...** CONBEA, 2007.
- ARRAES, F. D. D.; ANDRADE, E. M.; PALÁCIO, H. A. Q.; FROTA, J. I. J.; SANTOS, J. C. N. Identificação dos íons determinantes da condutividade elétrica nas águas superficiais da bacia do Curu, Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, v. 40, p. 346-355, 2009.
- AYERS, R. S; WESTCOT, D. W. **A qualidade da água na agricultura**. Campina Grande: UFPB, 1999, 153p. (Estudos da FAO: Irrigação e Drenagem, 29 revisado 1).
- BATISTA, T. M.; ANDRADE, E. A.; CRISÓSTOMO, L. A.; MEIRELES, M.; RODRIGUES, J. O. Modelagem da estrutura iônica das águas da bacia hidrográfica do Acaraú, Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, v. 37, n. 01, p. 1-6, 2006.
- CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de estimativa da evapotranspiração potencial do estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.
- D'ALMEIDA, D. B. A.; ANDRADE, E. M.; MEIRELES, A.C. M.; NESS, R. L. L. Importância relativa dos íons na salinidade de um cambissolo na Chapada do Apodi. **Revista Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 3, p. 615-621, 2005.
- FUNCEME - Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. **Projeto estudo da qualidade das águas em reservatórios superficiais da bacia Metropolitana**. Fortaleza, v. 01, p. 142, 2002.
- LOPES, F. B.; ANDRADE, E. M.; MEIRELES, A. C. M.; BECKER, H.; BATISTA, A. A. Assessment of the water quality in a large reservoir in semiarid region of Brazil. **Revista**

- Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, p. 437-445, 2014.
- MAIA, C. E.; MORAIS, E. R. C.; OLIVEIRA, M. Classificação da composição iônica da água de irrigação usando regressão linear múltipla. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 1, p. 55-59, 2001.
- MILTON, J. S. **Statistical methods in the biological and health sciences**. 2ed. New York: McGraw-Hill, 1992. 526p.
- PALÁCIO, H. A. Q.; ARAÚJO NETO, J. R.; MEIRELES, A.C. M.; CHAVES, L. C. G.; Similaridade e fatores determinantes na salinidade das águas superficiais do Ceará, por técnicas multivariadas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 4, p. 395-402, 2011.
- RIBEIRO, G. M.; MAIA, C. E.; MEDEIROS, J. F. Uso da regressão linear para estimativa da relação entre a condutividade elétrica e a composição iônica da água de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 1, p. 15-22, 2005.
- RODRIGUES, J. O.; ANDRADE E. M., CRISÓSTOMO, L. A., TEIXEIRA, A. S. Modelos da concentração iônica em águas subterrâneas no Distrito de Irrigação Baixo Acaraú. **Revista Ciência Agronômica**, v. 38, n. 4, p. 360-365, 2007.
- SANTOS, J. C. N.; MEIRELES, A. C. M.; ANDRADE, E. M.; ARAUJO NETO, J. R. Modelagem da concentração de sódio, cálcio e magnésio nas águas superficiais da bacia do rio Acaraú. In: XIX Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem – CONIRD, Montes Claro. **Anais...** Montes Claros – MG, 2009.
- WICHELNS, D.; CONE, D.; STUHR, G. Evaluating the impact of irrigation and drainage policies on agricultural sustainability. **Irrigation and Drainage Systems**, v. 16, p. 1-14, 2002.
- WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, v. 2, p. 184-194, 1981.
- ZHANG, B.; SONG, X.; ZHANG, Y.; HAN, D.; TANG, C.; YU, Y.; MA, Y. Hydrochemical characteristics and water quality assessment of surface water and groundwater in Songnen plain, Northeast China. **Water Research**, v. 46, p. 2737 – 2748, 2012.