

Seleção dos indicadores da salinidade das águas superficiais da bacia Metropolitana do Ceará pelo emprego da análise multivariada

José Ribeiro de Araújo Neto¹, Maria Monaliza de Sales², Helba Araújo de Queiroz Palácio³,
José Bandeira Brasil⁴; Luiz Carlos Guerreiro Chaves⁵

¹ Mestre em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal do Ceará, DENA/CCA/UFC. Técnico no Laboratório de Água, Solos e Tecidos Vegetais - LABAS do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE, Campus Iguatu. Fone: (88) 9900-2932. E-mail: juniorifcelabas@gmail.com;

² Graduanda do Curso de Tecnologia em Irrigação e Drenagem do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE, Campus Iguatu. monnallysa2011@hotmail.com;

³ Doutora em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal do Ceará, DENA/CCA/UFC. Professora do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE, Campus Iguatu. helbaraujo23@yahoo.com.br;

⁴ Graduando do Curso de Tecnologia em Irrigação e Drenagem do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE, Campus Iguatu. josebbrasil@gmail.com;

⁵ Doutorando em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal do Ceará, DENA/CCA/UFC. luizcarlosguerreiro@gmail.com.

Resumo: O objetivo desta pesquisa foi avaliar o comportamento da salinidade das águas superficiais de reservatórios da bacia Metropolitana do Ceará, Brasil, bem como, identificar através da técnica de estatística multivariada Análise Fatorial/Análise de Componentes Principais (AF/ACP) os fatores determinantes na variabilidade da salinidade das águas. Os dados utilizados foram fornecidos pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará disponibilizados ao Instituto Nacional Científico Tecnológico em Salinidade/UFC-INCT Sal sendo um total de 290 amostras de 7 reservatórios. Os parâmetros avaliados foram: Condutividade elétrica (CE), Sódio (Na^+), Cálcio (Ca^{+2}), Magnésio (Mg^{+2}), Cloreto (Cl^-) e Bicarbonato (HCO_3^-). Os resultados mostram que as águas dos reservatórios estudados apresentaram riscos de causar problemas de salinidade aos solos e toxidez as plantas variando nenhum a severo, sendo os açudes Castro e Pompeu Sobrinho, com os principais problemas de concentração de sais. Pelo emprego da AF/ACP foi identificado um modelo de melhor ajuste composto por dois fatores explicando 89,02% da variância total. O primeiro fator está relacionado aos sais totais dissolvidos nas águas superficiais, sendo representado pelos parâmetros CE, Na^+ , Cl^- , Ca^{+2} e Mg^{+2} . O segundo fator, basicamente, expressa o efeito da dissolução de sais de carbonatos ao longo da bacia representado pelo ânion HCO_3^- .

Palavras-chave: qualidade de água, águas superficiais, análise multivariada, semiárido.

Selection of indicators of salinity in surface waters of the Metropolitan basin, Ceará using multivariate analysis

Abstract: The objective of this research was to evaluate the behavior of salinity of surface water reservoirs of the Metropolitan bowl of Ceará, Brazil, as well as identify by multivariate statistical Factor Analysis/Principal Components Analysis (FA/PCA) the determining factors in the variability of water salinity. The data were supplied by the Company of Water Resources Management of Ceará available to the National Institute for Scientific and Technological Salinity/UFC - INCTSal with a total of 290 samples of 7 reservoirs. The parameters evaluated were: electrical conductivity of water (EC), sodium (Na^+), calcium (Ca^{+2}), magnesium (Mg^{+2}), chloride (Cl^-) and bicarbonate (HCO_3^-). The results show that the waters of the reservoirs showed no risk to severe risk of causing salinity problems and toxicity for use in irrigated agriculture, and the Castro and Pompeu Sobrinho dams, with the main problems of concentration of salts. The FA/PCA best fit a model consisting of two factors explaining 89.02% of total variance was identified. The first factor is related to the total dissolved salts in surface water, represented by the parameters EC, Na^+ , Cl^- , Ca^{+2} and Mg^{+2} . The second factor basically expresses the effect of dissolving salts of carbonates in the basin represented by the HCO_3^- anion.

Keywords: water quality, surface water, multivariate analysis, semiarid.

Introdução

Dentre os recursos naturais fundamentais, a água é o que possui maior destaque, pois sua disponibilidade é necessária a todo tipo de vida no planeta, bem como para a maioria dos meios de produção. A disponibilidade de água significa que ela deve estar presente não somente em quantidade, mas também que sua qualidade seja satisfatória para suprir as necessidades dos seres vivos (Ayers & Westcot, 1999). Dentre os Estados que compõe a região semiárida brasileira, o Ceará é aquele onde se tem maior extensão de semiárido, sendo o pioneiro na instalação da política de açudagem com o propósito de minimizar a escassez de água principalmente no período de seca (Meireles, 2007; Palácio et al., 2011).

As águas armazenadas em reservatórios superficiais são a principal fonte de abastecimento para as grandes demandas oriundas do consumo humano, animal e, sobretudo, da agricultura irrigada. No entanto, as águas armazenadas nos reservatórios superficiais são abastecidas essencialmente com a água de drenagem, resultante da precipitação sobre uma área, que carrega concentrações de sais e elementos refletindo as propriedades das rochas e dos solos por ela lavados durante os processos de escoamento superficial e percolação (Silva Júnior et al.; 2000). O indicativo da concentração de sais solúveis na água de irrigação é dado pela condutividade elétrica (CE) a qual corresponde à medida da capacidade dos íons presentes na água em conduzir eletricidade e cresce proporcionalmente ao aumento da concentração de sais. O aumento nos valores da condutividade elétrica da água é acompanhado, principalmente, pela elevação nos níveis de Na^+ , Cl^- , Ca^{+2} e Mg^{+2} (Silva Júnior et al.; 2000; Arraes et al., 2009). O conhecimento do teor total de sais solúveis (condutividade elétrica) presentes na água e o comportamento de seus íons dominantes permite a utilização e manejo da água de forma mais adequada no uso para agricultura irrigada (Ayers & Westcot, 1999).

Entretanto, para se avaliar o estado da qualidade das águas, é necessário que programas de monitoramento sejam implementados, visando uma avaliação das suas características (Girão et al., 2007; Andrade et al., 2007; Araújo Neto, 2010; Palácio et al.; 2011). O resultado dessas ações produz matrizes de proporções inadequadas à interpretação, devido ao grande número de parâmetros analisados. Com um número muito grande de variáveis, o número de relações entre elas é, também, muito grande para ser compreendido. Uma importante decisão no monitoramento é definir as variáveis mais significativas para retratar o problema.

Assim, torna-se necessário o emprego de técnicas que possam resumir, sistematicamente, a correlação significativa existente entre as variáveis (Palácio, 2004; Andrade et al. 2007; Meireles, 2007). Uma das diversas técnicas de análise exploratória de dados utilizada é a análise multivariada, que corresponde a um grupo de técnicas estatísticas que buscam relacionar as variáveis pesquisadas, possibilitando, dentre outras funções, promover a redução do número de variáveis com o mínimo de perda de informações da qualidade das águas (Monteiro & Pinheiro, 2004).

Na redução dos dados de monitoramento de água, técnicas de estatística multivariada, como Análise de Componentes Principais (ACP) vêm sendo empregada com frequência por diversos pesquisadores (Palácio, 2004; Andrade et al., 2007; Girão et al., 2007; Meireles, 2007; Andrade et al., 2009; Araújo Neto, 2010; Palácio et al. 2011; Wu & Kuo, 2012; Magyar et al., 2013). A grande contribuição da análise de componentes principais é selecionar aquelas variáveis de maior participação em cada fator (componentes) e definir as que deverão ser monitoradas. Para os estudos de qualidade de água este fato é muito importante, pois possibilita a redução dos parâmetros a serem monitorados, reduzindo-se, assim, os custos com análises de variáveis de menor importância na qualidade das águas (Andrade et al., 2007; Magyar et al., 2013).

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento da salinidade das águas superficiais de reservatórios da bacia Metropolitana do Estado do Ceará, bem como, empregar a técnica de estatística multivariada Análise Fatorial/ Análise de Componentes Principais com o propósito de identificar os fatores determinantes na variabilidade da salinidade nas águas dos reservatórios.

Material e Métodos

Área de estudo

O estudo foi realizado na bacia Metropolitana do Estado do Ceará, localizado na região norte do Estado. A Figura 1 ilustra a área do levantamento bem como os 7 reservatórios estudados ao longo da bacia metropolitana do Estado Ceará: Pacajus (240 milhões m^3), Pacoti (370 milhões m^3), Sítios Novos (126 milhões m^3), Aracoiaba (170 milhões m^3), Riachão (46 milhões m^3), Castro (64 milhões m^3) e Pompeu Sobrinho (143 milhões m^3).

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. Essas variações são decorrentes da proximidade do litoral, onde os índices pluviométricos são maiores e as temperaturas mais amenas e decorrentes

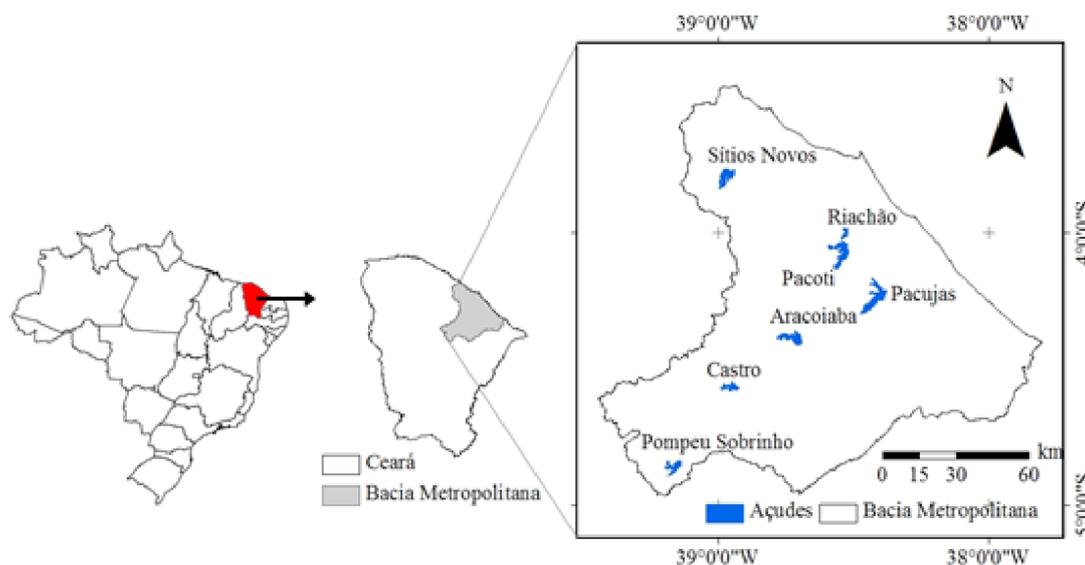


Figura 1. Localização dos reservatórios na bacia Metropolitana do Ceará, Brasil

do relevo e altitudes elevadas (serras de Baturité), onde a ocorrência de precipitações orográficas também induz a índices pluviométricos significativos que se somam às temperaturas mais baixas. A região apresenta uma grande variabilidade pluviométrica tempo-espacial para os períodos diário, mensal, estacional e anual. Na porção ocidental da região, as condições climáticas são mais secas, a precipitação média oscila em torno de 900 a 1.200 mm, 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 em Guarimiranga e 2.694,3 horas/ano em Fortaleza (Funceme, 2002).

A Bacia Metropolitana de Fortaleza engloba três grandes domínios distintos. O primeiro, mais antigo, é composto pelas rochas cristalinas, o segundo grande domínio é formado pelas rochas sedimentares que compõem o Grupo Barreiras e o terceiro domínio é constituído pelos sedimentos eólicos litorâneos, que constituem as dunas. Cabe mencionar ainda a presença, ao longo das planícies dos grandes rios como o Choró, Pacoti, Ceará e Pirangi, dos sedimentos aluviais recentes, localmente coluviais (Funceme, 2002). Os principais tipos de solos encontrados na bacia Metropolitana são: Podzólico Vermelho-Amarelo Distrófico, Podzólico Vermelho-Amarelo Eutrófico, Bruno Não Cálcico, Planossolo Solódico, Solonetz Solodizado, Solonchak, Vertissolos, Solos Litólicos, Regossolos Eutróficos e Distróficos, Areias Quartzosas Distróficas e Solos Aluviais (Funceme, 2002).

O trabalho 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. Os parâmetros avaliados foram Condutividade elétrica da água (CE), Sódio (Na^+), Cálcio (Ca^{+2}), Magnésio (Mg^{+2}), Cloreto (Cl^-) e Bicarbonato (HCO_3^-) sendo o monitoramento realizado entre os anos de 1998 a 2009, totalizando 290 amostras.

Análise estatística dos dados

Para se conhecer as características e o comportamento dos parâmetros estudados, sua tendência central (mediana), a variabilidade de seus valores (amplitude, extremos, discrepantes) e quartis e intervalos interquartílicos, desenvolveu-se uma análise exploratória, individualmente, para cada um dos 7 reservatórios monitorados na bacia metropolitana do Ceará pelo emprego da técnica de “Boxplot” com auxílio do software SPSS 16.0 for Windows. As posições relativas da mediana, primeiro e terceiro quartil dão uma noção da assimetria da distribuição. Os comprimentos das caudas são dados pelas linhas que vão do retângulo aos valores discrepantes.

A técnica de estatística multivariada Análise Fatorial/ Análise de Componentes Principais foi aplicada a partir dos dados totais, para identificar os fatores fundamentais que governam a salinidade das águas superficiais dos reservatórios da bacia Metropolitana do Ceará. Os dados originais, na forma de matriz, eram expressos por $X = (x_{ij})$, em que $i = 1 \dots n$ amostragens (290) e $j = 1 \dots p$ variáveis (6). Na aplicação da técnica AF/ ACP, a primeira etapa é transformar a matriz de dados originais em uma matriz de correlação $[R]$ ($p \times p$), para p igual aos 6 parâmetros de qualidade de água analisados neste estudo. Após a definição da matriz de correlação (Equação 1), realizou-se uma inspeção entre os parâmetros com o objetivo de identificar as

variáveis mais específicas, visto que a finalidade da AF/ACP é obter componentes que ajudem a explicar essas correlações.

$$R = \begin{bmatrix} r & r_{12} & \cdots & r_{1p} \\ r_{21} & 1 & \cdots & r_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{p1} & r_{p2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Antes de aplicar o método de extração de fatores, faz-se necessário verificar, a partir da matriz de correlação, a adequabilidade do conjunto de variáveis ao procedimento estatístico. Análise de adequabilidade das variáveis para a análise de fator foi realizada através do teste de Bartlett e o KMO - Kaiser-Meyer-Olkin proposto por Kaiser (Norusis, 1990; Monteiro & Pinheiro, 2004; Andrade et al., 2007). Este segundo teste compara a magnitude dos coeficientes de correlação observada com a magnitude dos coeficientes de correlações parciais através da equação. Os intervalos do teste podem ser vistos na Tabela 1.

O objetivo da extração de fator neste estudo é determinar os fatores representativos da variabilidade da qualidade da água, contida no total dos dados, com o mínimo de perda das informações. Uma vez que a análise fatorial necessita que o número de fatores seja conhecido anteriormente, os fatores foram determinados pela ACP (Wunderlin et al., 2001). Na ACP, combinações lineares das variáveis são formadas. A primeira componente principal é a combinação que explica a maior contribuição para a variância na amostra. A segunda componente principal explica a segunda maior contribuição para a variância, sem estar correlacionada com a primeira. Sucessivas componentes explicam porções progressivamente menores da variância da amostra total, sem apresentar correlação com as componentes anteriores.

Segundo Norusis (1990), o modelo matemático para análise de fator apresenta semelhança com uma equação de regressão múltipla. Cada variável é expressa como uma combinação linear de fatores que não são observadas de fato.

Tabela 1. Intervalo de validade do teste KMO, para aplicação do modelo de análise de fator

Valor de KMO	Aplicação do modelo
$KMO \geq 0,9$	Excelente
$0,8 \leq KMO < 0,9$	Ótima
$0,7 \leq KMO < 0,8$	Boa
$0,6 \leq KMO < 0,7$	Regular
$0,5 \leq KMO < 0,6$	Medíocre
$KMO < 0,5$	Inadequada

Em geral, o modelo para i-ésima variável normalizada é escrito como:

$$X_j = A_{i1}F_1 + A_{i2}F_2 + \cdots + A_{ik}F_k + U_i \quad (2)$$

em que:

- F – fatores comuns;
- A – constantes combinadas dos fatores k;
- U – erro experimental.

O modelo assume que os erros experimentais não têm correlação com os fatores comuns. Os fatores são deduzidos das variáveis observadas e podem ser calculados como combinações lineares. É possível que todas as variáveis contribuam para o fator de qualidade da água, no entanto espera-se que um único subconjunto de variáveis caracterize a qualidade da água, como o indicado pelos grandes coeficientes. A expressão geral para a estimativa do fator k-ésimo F_k é:

$$fk = \sum_{i=1}^p W_{ki}X_i = W_{k1}X_1 + W_{k2}X_2 + \cdots + W_{kp}X_p \quad (3)$$

em que:

- W – coeficiente de contagem de cada fator;
- p – número de variáveis.

As comunalidades medem a capacidade que têm as componentes retiradas de explicar a variação de cada variável original; apresentam valores variando de 0 a 1 (Norusis, 1990). “Zero” indica que as componentes não explicam nada da variância e “Um” indica que toda a variância é explicada pelas componentes que compõem o modelo. A comunalidade é estimada pela seguinte equação:

$$VX_{ij} = \sum C_{ij}^2 \quad (4)$$

em que:

- VX_{ij} – variância referente à variável X_{ij} ;
- C_{ij} – representa o valor da componente referente à variável X_{ij} .

Isto significa que VX_{ij} explica a variância contida na variável X_{ij} que são explicadas pelas componentes que compõem o modelo.

A matriz das componentes obtidas na fase de extração pode apresentar, às vezes, resultados de difícil interpretação com relação aos fatores significantes. Para superar esta limitação, a transformação da matriz em uma outra de mais fácil interpretação pode ser efetuada utilizando a rotação da análise de fator. A rotação não afeta o valor de ajuste de uma solução de

fator, de maneira que a comunalidade e a porcentagem de variância total explicada não são alteradas. A porcentagem de variância considerada por cada um dos fatores faz, porém, a mudança.

O método de rotação minimiza a contribuição dos parâmetros de menor significância no fator (Helena et al., 2000; Wunderlin et al., 2001, Andrade et al., 2007; Wu & Kuo, 2012), de modo que os parâmetros passam a apresentar pesos próximos à zero ou à unidade, eliminando os valores intermediários responsáveis por dificultar a interpretação.

Entre os dois modelos de rotação (ortogonal e oblíquo) selecionou-se o primeiro tomando-se por base os trabalhos apresentados por Helena et al. (2000); Palácio (2004); Andrade et al. (2007); Meireles (2007); Araújo Neto (2010); Palácio et al. (2011) e Wu & Kuo (2012) onde empregaram a ACP para avaliar a variação na qualidade de água. O método Varimax tem por finalidade minimizar a contribuição das variáveis com menor significância no fator (Wunderlin et al., 2001). Com o método, as variáveis passam a apresentar pesos próximos a um ou zero, eliminando os valores intermediários, que dificultam a interpretação dos fatores.

Resultados e Discussão

Para se conhecer as características e o comportamento dos íons específicos, sua tendência central, a variabilidade espacial de seus valores e percentis, desenvolveu-se uma análise exploratória, individualmente, para cada um dos 7 reservatórios estudados na bacia Metropolitana do Ceará, pelo emprego da técnica de “Boxplot”. Na Figura 2 verifica-se estas características para a condutividade elétrica – CE (Figura 2A) e os íons Cloreto – Cl⁻ (Figura 2B) e Sódio – Na⁺ (Figura 2C). Constata-se que a condutividade elétrica das águas, para os 7 açudes monitorado (Figura 2A) apresentaram valores que variaram entre 0,23 a 1,57 dS.m⁻¹ sendo considerado seu risco de nenhum (CE > 0,70 dS.m⁻¹) a moderado (0,70 dS.m⁻¹ > CE > 3,00 dS.m⁻¹) para uso na agricultura irrigada. Destaca-se as maiores salinidades das águas nos açude Pompeu Sobrinho em seguida o Castro. O açude Pompeu Sobrinho é o de maior problema de salinidade na bacia metropolitana com valor mínimo de CE = 1,25 dS.m⁻¹ apresentando, durante todo o período de estudo, classificado como moderado risco de uso das águas para irrigação. O açude Castro apresentou mediana em mais de 75% das amostras com valores de CE acima do limite de 0,70 dS.m⁻¹ para uso na irrigação.

Em uma avaliação da toxidez dos íons cloreto (Cl⁻) e do sódio (Na⁺) pra as águas superficiais dos

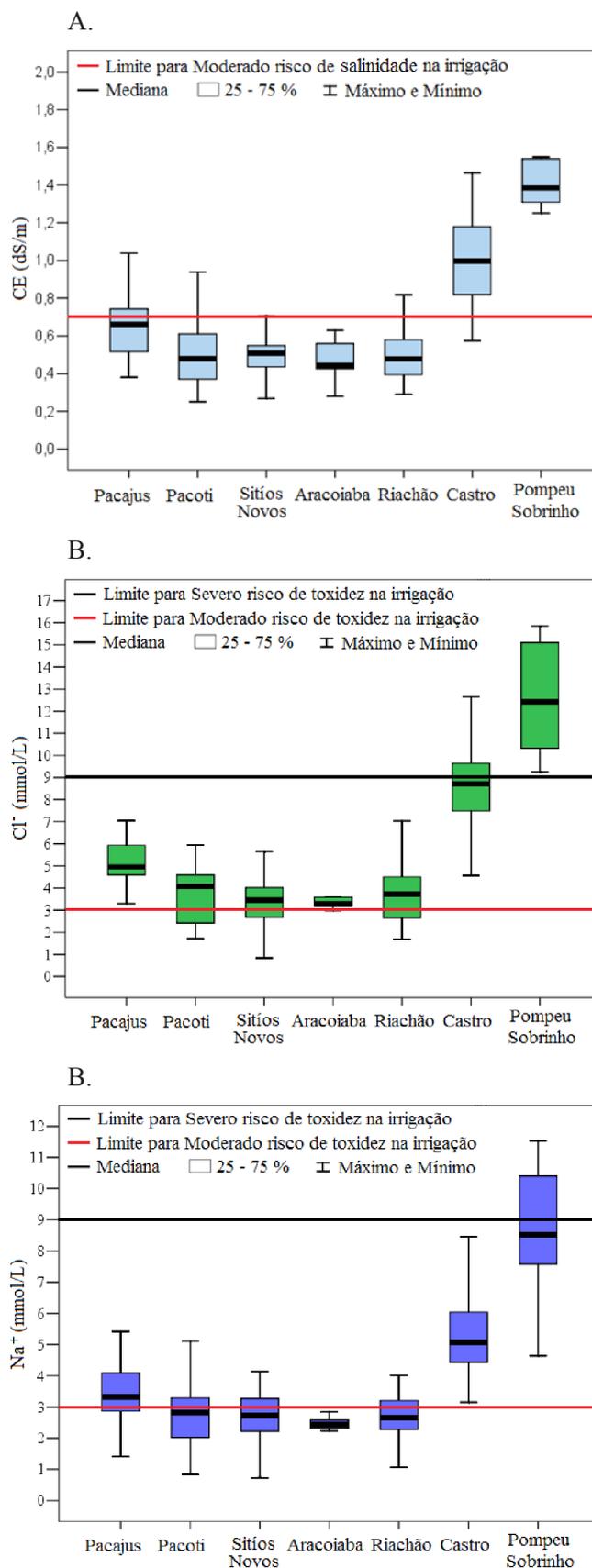


Figura 2. Variabilidade espacial dos parâmetros condutividade elétrica (A); cloreto (B) e sódio (C) nas águas superficiais de reservatórios da bacia Metropolitana do Ceará

reservatórios da bacia Metropolitana do Ceará, verifica-se que os íons apresentaram restrições de nenhuma a severa de acordo com os limites estabelecidos por Ayers e Westcot (1999) para o uso das águas para irrigação. As concentrações variaram entre 0,8 a 15,9 $\text{mmol}_c\cdot\text{L}^{-1}$ para o íon Cl^- e entre 0,4 a 11,5 $\text{mmol}_c\cdot\text{L}^{-1}$ para o íon Na^+ . Para o íon Cl^- (Figura 2B) pode-se notar no intervalo interquartilico (dentro do retângulo) que a mediana foi superior a 3 $\text{mmol}_c\cdot\text{L}^{-1}$ limite de moderado grau de restrição para uso na irrigação para todos os reservatórios, exceto para o Pompeu Sobrinho em que não somente a mediana, mas todas as amostras apresentaram concentrações de Cl^- superior a 9 $\text{mmol}_c\cdot\text{L}^{-1}$ limite de severo grau de restrição para uso na irrigação. O íon Na^+ (Figura 2C) apresentou variação espacial para os reservatórios similar a variação do Cl^- com os reservatórios Castro e principalmente Pompeu Sobrinho apresentando maiores concentrações, sendo a toxidez do Na^+ variando de moderado a severo durante todo o período de monitoramento.

De acordo com Silva Júnior et al. (2000) as águas do cristalino do Nordeste brasileiro classificam-se, na sua maioria, como cloretadas sódicas com alguma variação, de acordo com a litologia do local de origem. No caso da bacia Metropolitana do Ceará, essas altas concentrações de Cl^- e Na^+ estão relacionadas à formação geológica composta em partes por rochas cristalinas, no entanto, outra forte influência para essas águas são as altas concentrações dos íons Cl^- e Na^+ na bacia que se dão em decorrência da ação antrópica como deposição de esgotos domésticos e a lavagem de roupas presente nesta bacia, concordando com assertiva verificada por Frota Junior et al. (2007). Por se tratar de uma bacia litorânea, não se deve descartar, também, a influência da proximidade do mar e dos aerossóis marinhos, pois a água da chuva apresenta o íon Cl^- como o elemento mais abundante, seguido do Na^+ (Meireles et al., 2007). Predominância de águas cloretadas e sódicas no semiárido nordestino, também foram observadas por Barroso et al. (2011) avaliando a qualidade da água para irrigação na região Centro Sul no Estado do Ceará. Em outras regiões do globo a predominância de águas sódicas também foram verificadas por Magyaret al. (2013) em águas superficiais do lago NeusiedlerSee na Áustria.

Na Figura 3 verifica-se o comportamento e a variação espacial dos íons bicarbonato – HCO_3^- (Figura 3A); Cálcio – Ca^{+2} (Figura 3B) e Magnésio – Mg^{+2} (Figura 3C) para cada um dos 7 reservatórios estudados na bacia Metropolitana do Ceará.

Em uma avaliação da toxidez do íon HCO_3^- verifica-se valores variando entre 0,66 a 3,10 $\text{mmol}_c\cdot\text{L}^{-1}$

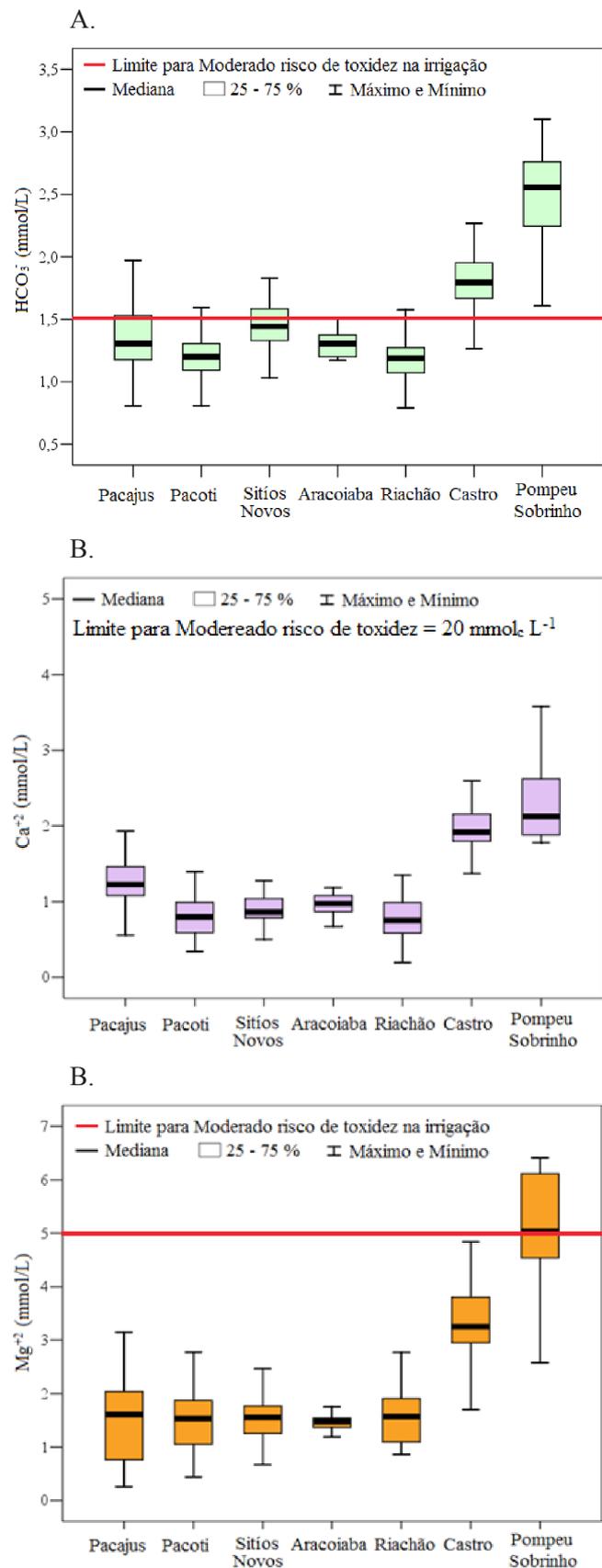


Figura 3. Variabilidade espacial dos parâmetros bicarbonato (A); cálcio (B) e magnésio (C) nas águas superficiais de reservatórios da bacia Metropolitana do Ceará

sendo considerado seu risco de nenhum ($\text{HCO}_3^- < 1,50 \text{ mmol}_c \cdot \text{L}^{-1}$) a moderado ($1,50 \text{ mmol}_c \cdot \text{L}^{-1} > \text{CE} > 8,50 \text{ mmol}_c \cdot \text{L}^{-1}$) para uso na agricultura irrigada. Resultados semelhantes para reservatório no Ceará foram observados por Araújo Neto (2010) estudando a qualidade das águas do açude Orós para fins de irrigação, com concentração de HCO_3^- variando entre 1,00 a 4,80 $\text{mmol}_c \cdot \text{L}^{-1}$ sendo considerado seu risco de nenhum a moderado. Estes resultados também estão de acordo com os encontrados por Arraes et al. (2009), na identificação dos íons determinantes da condutividade elétrica das águas superficiais da bacia do Curu, que observou ao longo da bacia um valor médio de bicarbonato de 2,04 $\text{mmol}_c \cdot \text{L}^{-1}$ o que, segundo Ayers e Westcot (1999), expressam um grau de restrição ligeira a moderada para o uso na irrigação. Ainda de acordo com esses autores supracitados, quando são utilizadas águas para irrigação com elevados teores de bicarbonatos pode ocorrer a precipitação de cálcio, na forma de carbonato de cálcio, facilitando um suposto processo de sodificação do solo.

Avaliando os íons cálcio (Ca^{+2}) e magnésio (Mg^{+2}) para as águas superficiais dos reservatórios da bacia metropolitana do Ceará, verifica-se que os íons apresentaram valores variando, respectivamente entre 0,20 a 3,58 $\text{mmol}_c \cdot \text{L}^{-1}$ e 0,26 a 6,51 $\text{mmol}_c \cdot \text{L}^{-1}$. Estas concentrações de Ca^{+2} e Mg^{+2} não são preocupantes, pois de acordo com Ayers & Westcot (1999) valores inferiores a 20 $\text{mmol}_c \cdot \text{L}^{-1}$ para Ca^{+2} e 5 $\text{mmol}_c \cdot \text{L}^{-1}$ para Mg^{+2} expressam águas com baixo grau de restrição para uso na irrigação. A exceção é dada para 50% dos dados de Mg^{+2} do açude Pompeu Sobrinho, que apresentaram valores do terceiro e quarto quartil acima do limite de 5 $\text{mmol}_c \cdot \text{L}^{-1}$. Os referidos autores afirmam ainda que a função do cálcio no solo não está completamente estabelecida e, ao que parece, ele reduz os efeitos tóxicos dos íons Na^+ e Mg^{+2} quando são absorvidos pelas raízes. O cálcio também confere a dureza da água, podendo formar incrustações nas tubulações de irrigação (Arraes et al., 2009). Concentrações de Ca^{+2} e Mg^{+2} abaixo dos limites estabelecidos por Ayers & Westcot (1999) também foram verificadas em águas superficiais por Barroso et al. (2011) na região Centro Sul do Ceará.

Para a identificação dos parâmetros mais significativos na variabilidade da salinidade das águas superficiais de reservatórios da bacia Metropolitana do Ceará, foi aplicada a técnica de estatística multivariada Análise Fatorial/Análise de Componentes Principais. Na primeira etapa foram selecionadas as variáveis CE, Cl⁻, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ e HCO₃⁻ atingindo no teste de esfericidade de Bartlett o valor igual a 2.354,6

demonstrando significativo, permitindo rejeitar a hipótese de que a matriz de correlação é uma matriz-identidade, isto é, que as variáveis não são correlacionadas. Pelo teste de adequacidade Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), aplicado para comparar a magnitude dos coeficientes, foi encontrado um valor igual a 0,824, considerado ótimo conforme Tabela 2, indicando que o modelo fatorial pode ser aplicado aos dados dos 6 indicadores sem restrições, uma vez que a limitação do modelo começa quando KMO é inferior a 0,5. Coeficientes de KMO superiores a 0,7 indicando bom desempenho do modelo também foram encontrados em estudos de qualidade de água no Estado do Ceará (Palácio, 2004; Andrade et al., 2009; Araújo Neto, 2010)

A partir dos 6 indicadores de salinidade de água selecionados CE, Cl⁻, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ e HCO₃⁻ elaborou-se a matriz de correlação apresentada na Tabela 3. Pela referida matriz, observa-se que as variáveis estudadas apresentaram correlação superior a 0,65 com todas as outras variáveis. Helena et al. (2000), Andrade et al. (2007) e Palácio et al. (2011) consideram que o coeficiente de correlação superior a 0,5 expressa uma forte relação. As maiores correlações observadas foram para os pares: CE – Cl⁻ (0,947); Cl⁻ – Na⁺ (0,943) e CE – Na⁺ (0,893); Cl⁻ – Mg²⁺ (0,848) e CE – Mg²⁺ (0,842). Destaca-se o parâmetro HCO₃⁻ que apesar de apresentar correlações fortes com todos os parâmetros (CE, Cl⁻, Na⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺), com nenhum deles a correlação foi superior a 0,7. Altas correlações entre a CE e Cl⁻ e CE e Na⁺ também foram observadas em estudos realizados por Girão et al. (2007) no rio Jaibaras, Ceará; Andrade et al. (2007) na bacia do rio Acaraú, Ceará e Palácio et al. (2011) para os reservatórios do Estado do Ceará. Essas maiores correlações entre CE, Cl⁻ e Na⁺ era esperada, uma vez que de acordo com Silva Júnior et al. (2000) as águas do cristalino do Nordeste brasileiro classificam-se, na sua maioria, como cloretadas sódicas com alguma variação, de acordo com a litologia do local de origem. Acredita-se que além das condições naturais da região, as concentrações destes elementos também sejam decorrentes de ações antrópicas, como resíduos de esgotos domésticos, que apresentam altas concentrações de sais pericialmente o cloreto (Frota Junior et al., 2007), e por se tratar de uma bacia litorânea, não se deve descartar, também, a influência da proximidade do mar e dos aerossóis marinhos, pois

Tabela 2. Teste de esfericidade de Bartlett e teste de adequacidade Kaiser-Meyer-Olkin (KMO)

Testes	Valor
KMO	0,824
Teste de Bartlett	2.354,6
Sig.	0,000

Tabela 3. Matriz de correlação das variáveis analisadas nas águas superficiais de reservatórios da bacia Metropolitana do Ceará

	CE	Cl ⁻	Na ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	HCO ₃ ⁻
CE	1					
Cl ⁻	0,947	1				
Na ⁺	0,893	0,943	1			
Ca ⁺²	0,824	0,817	0,684	1		
Mg ⁺²	0,842	0,848	0,736	0,757	1	
HCO ₃ ⁻	0,693	0,694	0,669	0,665	0,688	1

a água da chuva apresenta o íon Cl⁻ como o elemento mais abundante, seguido do Na⁺ (Meiros et al., 2007).

Na etapa seguinte, quando da extração dos fatores ou componentes, o modelo que melhor se ajustou aos dados foi aquele composto por dois fatores. O modelo composto por dois fatores foi adequado para representar os processos que definem a salinidade das águas superficiais da bacia Metropolitana e explicar 89,02% da variância total, antes diluída em 6 dimensões. A seleção do modelo apresentando dois fatores teve como base o critério descrito por Norusis (1990) de considerar somente aqueles fatores com variância que apresentarem autovalor superior a 1. Este critério fundamenta-se no fato de que qualquer fator deve explicar uma variância superior àquela apresentada por uma simples variável (Helena et al. 2000).

Para suplantar as dificuldades na identificação das variáveis mais significativas na matriz de pesos fatoriais, em decorrência de valores muito próximos entre si, aplicou-se a transformação ortogonal pelo emprego do algoritmo varimax, para a maximização e minimização dos maiores e menores autovalores, respectivamente. Pesquisadores como Palácio et al; (2011) e Wu & Kuo (2012) obtiveram uma matriz de mais fácil interpretação com a aplicação do algoritmo varimax na elaboração da matriz transformada. Como afirmaram Monteiro & Pinheiro (2004), a matriz rotacionada pelo algoritmo gera uma melhor distribuição da variância total entre os fatores. Os pesos fatoriais atribuídos a cada fator, as communalidades de cada variável e a variância explicada após a aplicação do algoritmo podem ser observados na Tabela 4. Após a rotação, os dois fatores explicaram respectivamente 58,87 e 30,15% da variância total dos dados. Resultados semelhantes em termos de variância explicada foram encontrados por Mendiguchía, et al. (2004); Palácio (2004); Palácio et al. (2011) e Magyar et al. (2013) trabalhando com águas superficiais.

Através dos valores apresentados pelas communalidades das variáveis, pode-se avaliar como o modelo descreve as variáveis originais. A communalidade expressa a variância referente a cada variável, que pode ser explicada pelos fatores através da análise da

Tabela 4. Valores das communalidades e pesos fatoriais dos fatores das matrizes na extração, após a rotação pelo algoritmo varimax

Variáveis	Comunalidades	V1	V2
CE	0,948	0,883	0,410
Cl ⁻	0,976	0,908	0,389
Na ⁺	0,883	0,884	0,317
Ca ⁺²	0,768	0,692	0,538
Mg ⁺²	0,807	0,733	0,519
HCO ₃ ⁻	0,959	0,358	0,911
Autovalor		3,53	1,81
Variância Explicada %		58,87	30,15
Variância Acumulada %		58,87	89,02

componente principal. Verifica-se que os parâmetros CE, Cl⁻ e HCO₃⁻ tiveram valores de communalidade superiores a 0,900; indicando que mais de 90% da variância contida em cada uma desses parâmetros foi explicado pelos dois fatores que compõem o modelo, os parâmetros Na⁺ e Mg⁺² apresentaram communalidades superiores a 0,800 e o Ca⁺² superior a 0,7.

Ainda na Tabela 4 podem ser observados os valores dos pesos fatoriais, que indicam as variáveis mais significativas em cada fator. No primeiro fator os indicadores que se destacaram foram: CE, Cl⁻, Na⁺ com pesos fatoriais superiores a 0,883 e ainda os parâmetros Ca⁺² e Mg⁺² com pesos fatoriais superiores a 0,692 indicando que esses parâmetros são os mais significativos na variação da salinidade das águas superficiais da bacia Metropolitana do Ceará. Esse fator está relacionado com os sais totais dissolvidos nas águas superficiais. Esses elementos podem ser oriundos tanto de fontes naturais (mineralização e aerossóis marinhos), como de fontes não naturais (esgotos domésticos). Como verificado por Silva Júnior et al. (2000) as águas do cristalino do Nordeste brasileiro classificam-se, na sua maioria, como cloretadas sódicas. No caso da bacia Metropolitana do Ceará, a presença de Cl⁻ e Na⁺ no primeiro fator com maiores pesos fatoriais, está relacionado à formação geológica composta em partes por rochas cristalinas. No entanto, outra influência para essas águas apresentarem altas concentrações dos íons Cl⁻ e Na⁺ na estação chuvosa pode estar relacionada aos resíduos de fertilizantes e cargas de esgotos domésticos provenientes da contribuição do escoamento neste período (Frota Junior et al., 2007; Barroso et al., 2011). Para o período de estiagem, pode-se atribuir a influência do processo de evaporação das águas, com altas intensidades em regiões semiáridas, provocando uma maior concentração dos sais (Meiros et al., 2007; Palácio et al. 2011). Por se tratar de uma bacia litorânea ainda deve-se considerar a influência da proximidade do mar e dos aerossóis marinhos (Meiros et al., 2007).

Já para o segundo fator, o parâmetro mais significativo foi o HCO_3^- com peso fatorial superior a 0,900. A associação do íon HCO_3^- ao segundo fator deve-se ao fato desse íon ter apresentado, apesar de forte, a menor correlação com os outros parâmetros selecionados, em que foi observado que com nenhum dos parâmetros a correlação foi superior a 0,7 (Tabela 3). Este fator, basicamente, expressa o efeito da dissolução de sais de carbonatos ao longo da bacia, principalmente nas formas de carbonato de cálcio e magnésio. A presença de bicarbonatos também pode ser associada a índices pluviométricos acima da média que provoca uma forte renovação das águas pouco mineralizadas. Resultados encontrados por Meireles (2007), avaliando a dinâmica qualitativa das águas superficiais da bacia do Acaraú, Ceará para irrigação, observaram que pelo fato do açude Forquilha apresentar uma redução significativa de volume por retirada na estação seca, quando houve o aumento rápido de seu volume na estação chuvosa, com a predominância de águas novas, pouco mineralizadas, acarretou um predomínio de águas bicarbonatadas.

Conclusões

1. De acordo com os limites estabelecidos pela literatura, as águas superficiais da bacia Metropolitana do Ceará apresentaram nenhuma restrição quanto aos riscos de causar salinidade no solo e toxidez as plantas, exceção para os açudes Castro e principalmente o Pompeu Sobrinho que apresentaram os maiores problemas de concentração de sais com restrições severas para uso na agricultura irrigada;

2. O emprego da Análise Fatorial/Análise do Componente Principal promoveu a redução das variáveis na salinidade das águas superficiais da bacia metropolitana para dois componentes, que explicam 89,02% da variância total dos dados;

3. A rotação das componentes mostrou que os parâmetros indicadores da salinidade das águas estão, principalmente, relacionados com o primeiro fator aos sais totais dissolvidos nas águas superficiais, sendo representado pelos parâmetros CE , Na^+ , Cl^- , Ca^{+2} e Mg^{+2} . O segundo fator, basicamente, expressa o efeito da dissolução de sais de carbonatos ao longo da bacia representado pelo ânion HCO_3^- .

Agradecimentos

Os autores agradecem à Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará - COGERH, ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Salinidade – INCTSal, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento

Científico e Tecnológico - CNPq pelo apoio financeiro ao desenvolvimento desta pesquisa e à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico - FUNCAP pela bolsa de produtividade da terceira autora.

Literatura Citada

- Andrade, E. A.; Girão, E. G.; Rosa, M. F.; Chaves, L. C. G.; Mendonça, M. A. B.; Meireles, A. C. M. Avaliação da qualidade das águas no açude Ayres de Souza pelo emprego da estatística multivariada. In: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2009, Campo Grande. 2009. Anais... Campo Grande: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2009.
- Andrade, E. M.; Araújo, L. F. P.; Rosa, M. F.; Paulino, W. D.; Alves, A. B. Seleção dos indicadores da qualidade das águas superficiais pelo emprego da análise multivariada. Revista Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.27, n.3, p.683-690, 2007.
- Araújo Neto, J. R. Avaliação da qualidade das águas do açude Orós por técnicas multivariadas. 2010. 113 f. Monografia (Tecnologia em Irrigação e Drenagem) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Campus Iguatu, Ceará, 2010.
- 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, Fortaleza, v.40, n.3, p.346-355, 2009.
- Ayers, R. S.; Westcot, D. W. A qualidade da água na agricultura. 2. ed. Campina Grande: UFPB, 1999. 153 p. (FAO, Irrigação e Drenagem, 29).
- Barroso, A. A. F.; Gomes, G. E.; Lima, A. E. O. Palácio, H. A. Q.; Lima, C. A. Avaliação da qualidade da água para irrigação na região Centro Sul no Estado do Ceará. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 15, n. 6, p. 588-593, 2011.
- Frota Júnior, J. I.; Andrade, E. M.; Meireles, A. C. M.; Bezerra, A. M.; Souza, B. F. S. Influência antrópica na adição de sais no trecho perenizado da bacia hidrográfica do Curu, Ceará. Revista Ciência Agronômica, Fortaleza, v.38, n.2, p.142-148, 2007.
- Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos – FUNCEME. Projeto estudo da qualidade das águas em reservatórios superficiais da bacia Metropolitana. Fortaleza, v.1, 580f., 2002.
- Girão, E. G.; Andrade, E. M.; Rosa, M. F.; Araújo, L. F. P.; Meireles, A. C. M. Seleção dos indicadores da qualidade de água no Rio Jaibas pelo emprego da análise da componente principal. Revista Ciência Agronômica, Fortaleza, v.38, n.1, p.17-24, 2007.

- Helena, B.; Pardo, R.; Vega, M.; Barrado, E.; Fernandez J. M.; Fernandez, L. Temporal evolution of ground water composition in an alluvial aquifer (Pisuerga river, Spain) by principal component analysis. *Water Research*, Amsterdam, v. 34, n. 3, p. 807-816, 2000.
- Magyara, N.; Hatvani, I. G.; Székelyb, I. K.; Herzigc, A.; Dinkad, M.; Kovácsa, J. Application of multivariate statistical methods in determining spatial changes in water quality in the Austrian part of Neusiedler See. *Ecological Engineering*, v. 55, p. 82-92, 2013.
- Meireles, A. C. M. Dinâmica qualitativa das águas superficiais da bacia do Acaraú e uma proposta de classificação para fins de irrigação. 2007. 180 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.
- Meireles, A. C. M.; Frischkorn, H.; Andrade, E. M. Sazonalidade da qualidade das águas do açude Edson Queiroz, bacia do Acaraú, no Semiárido cearense. *Revista Ciência Agronômica*, Fortaleza, v.38, n.1, p.25-31, 2007.
- Mendiguchia, C.; Moreno, C.; Galindo-Riño, M.D.; García-Varga, M. Using chemometric tools to assess anthropogenic effects in river water. A case study: Guadalquivirriver (Spain). *Analytica Chimica Acta*, v. 515, p.143-149, 2004.
- Monteiro, V. P.; Pinheiro, J. C. V. Critério para implantação de tecnologias de suprimentos de água potável em municípios cearenses afetados pelo alto teor de sal. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, Brasília, v.42, n.2, p.365-387, 2004.
- Norusis, M. J. *SPSS Base System User's Guide*. Chicago: SPSS Inc, 520p.1990.
- Palácio, H. A. Q. Índice de qualidade das águas na parte baixa da bacia hidrográfica do rio Trussu, Ceará. 2004. 96 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004.
- 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*, Campina Grande, v. 15, n. 4, p. 395-402, 2011.
- Silva Júnior, J. N.; Sousa, A. R.; Sá, V. A. L.; Lima, B. P. Relações entre a concentração de íons e a salinidade de águas subterrâneas e superficiais visando à irrigação no sertão de Pernambuco. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.4, n.2, p.189-193, 2000.
- Wu, E. M-Y.; Kuo, S.-L. Applying a Multivariate Statistical Analysis Model to Evaluate the Water Quality of a Watershed. *Water Environment Research*, v. 84, p. 2075-2085, 2012.
- Wunderlin, D. A.; Díaz, M. Del P.; Valeria, A. M.; Pesce, S. F.; Hued, A. C.; Bistoni, M L. A. Pattern recognition techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality. A case study: Suquia River Basin (Córdoba-Argentina). *Water Research*, Amsterdam, v. 35, n. 12, p. 2881-2894, 2001.