



# Variabilidade espaço-temporal da condutividade elétrica da água subterrânea na região semiárida de Pernambuco<sup>1</sup>

**Tafnes S. Andrade<sup>2</sup>, Suzana M. G. L. Montenegro<sup>3</sup>,  
Abelardo A. A. Montenegro<sup>4</sup> & Diogo F. B. Rodrigues<sup>4</sup>**

## RESUMO

Quando mal-conduzida, a irrigação pode causar degradação dos solos e da água subterrânea, por potencializar o risco de salinização. Este problema é mais evidente em regiões semiáridas, nas quais as características físico-climáticas contribuem para seu agravamento. Uma das variáveis mais utilizadas para avaliar a concentração de sais solúveis na água de irrigação e no solo, é a condutividade elétrica. Neste trabalho, buscou-se avaliar a variabilidade espacial e temporal da condutividade elétrica da água subterrânea utilizada para irrigação em um assentamento rural, no semiárido pernambucano. Técnicas estatísticas descritivas e geoestatísticas foram aplicadas para identificação dos padrões de variabilidade e dependência espacial da condutividade elétrica, visando ao mapeamento da salinidade da água subterrânea. Verificou-se que a condutividade elétrica possui variabilidade média a alta, com dependência espacial moderada, em que a textura do solo e o regime pluviométrico influenciam na variação espacial e temporal da condutividade elétrica, que vem aumentando ao longo dos anos, na área estudada.

**Palavras-chave:** dependência espacial, salinidade, aquífero aluvial

## Spatial temporal variability of electrical conductivity of groundwater in the semiarid region of Pernambuco, Brazil

## ABSTRACT

Irrigation, when poorly managed, can cause soil and groundwater degradation by increasing the salinization risk. This problem is evident in semiarid regions, where the physico-climatic characteristics contribute to enhance the problem. One of the main variables used to measure the soluble salts concentration in irrigation water and soil is the electrical conductivity. This work aimed to evaluate the spatial and temporal variability of electrical conductivity of groundwater for irrigation in a semiarid rural settlement in the State of Pernambuco. Descriptive statistics and geostatistical techniques have been applied to identify patterns of variability and spatial dependence of electrical conductivity aiming to map the groundwater salinity. It was found that the electrical conductivity has medium to high variability, with moderate spatial dependence, that the soil texture and rainfall influence the spatial and temporal variation of the electrical conductivity, which has increased over the years in the study area.

**Key words:** spatial dependence, salinity, alluvial aquifer

<sup>1</sup> Parte da Dissertação de Mestrado do primeiro autor apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Eng. Agrícola da UFRPE

<sup>2</sup> Av. Bel. Francisco Pereira Lopes, 235, Brejão, PE, CEP 55325-000. Fone: (87) 3761-0697. E-mail: tafnes.andrade@cprh.pe.gov.br

<sup>3</sup> DECIV/UFPE, Av. Acadêmico Hélio Ramos, s/n, Cidade Universitária, CEP 50740-530, Recife, PE. E-mail: suzanam@ufpe.br

<sup>4</sup> DTR/UFPE, Rua Dom Manoel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, CEP 52171-900, Recife, PE. E-mail: abelardo.montenegro@yahoo.com.br; diogoagriambi@hotmail.com

## INTRODUÇÃO

Em regiões cuja pluviometria não é capaz de satisfazer a demanda atmosférica e da cultura, é necessária a adoção da irrigação para que as culturas exploradas venham atingir desenvolvimento adequado e produtividades economicamente competitivas. O semiárido pernambucano está inserido neste universo, que se caracteriza pela irregularidade da distribuição temporal e espacial das chuvas e pelas elevadas taxas de evaporação.

Montenegro & Montenegro (2006) comentam que os vales aluviais do semiárido apresentam elevado potencial para a pequena agricultura irrigada, embora sejam susceptíveis ao acúmulo de sais, tanto na zona não-saturada quanto na saturada, a depender, dentre outros fatores, da distribuição espacial de suas características hidráulicas.

Ribeiro et al. (2005) afirmam que a condutividade elétrica (CE) é a variável mais empregada para se avaliar o nível de salinidade, constituindo um dos principais elementos de classificação da qualidade das águas para irrigação. A determinação da CE permite avaliar o perigo que a água oferece, em termos de salinização do solo (Amorim et al., 2010; Medeiros et al., 2003).

Normalmente, a qualidade da água subterrânea nos vales aluviais apresenta, quanto à salinidade, variação sazonal, pois é influenciada pelos condicionantes hidrológicos e climáticos, seja pelo efeito da diluição dos sais pela recarga pluviométrica, seja pelo efeito de concentração pela evaporação acentuada.

Alguns autores se têm dedicado a estudar a qualidade das águas subterrâneas destinadas ao uso agrícola no semiárido nordestino. Dentre esses trabalhos podem ser citados Andrade Júnior et al. (2006), que abordaram a questão da qualidade da água subterrânea destinada à irrigação no semiárido piauiense; Costa et al. (2006), que avaliaram os aspectos da salinização das águas de aquífero cristalino no Rio Grande do Norte; Fernandes et al. (2009), que estudaram os aspectos de qualidade físico-química das águas subterrâneas utilizadas na irrigação em Serra Talhada, PE, e Souza et al. (2006) e Montenegro et al. (2001), que analisaram a estrutura de dependência espacial da salinidade no mesmo aluvião em que o presente trabalho foi desenvolvido.

A análise da estrutura de dependência espacial pode ser realizada através de metodologia geoestatística. Enquanto a estatística clássica pressupõe não haver relação entre a variação e a distância entre pontos de amostragem, a geoestatística considera que os valores da variável estão relacionados à sua disposição espacial e, portanto, as observações tomadas a curta distância se assemelham mais do que aquelas tomadas a distâncias maiores (Landim, 2003).

Uma vez quantificada a dependência espacial das propriedades do solo, esta pode ser utilizada na interpolação entre observações, permitindo o mapeamento da propriedade do solo dentro da área, por meio da krigagem, técnica que permite a estimativa de valores de forma não tendenciosa e com variância mínima (Gonçalves et al., 2001), em locais não amostrados.

O conhecimento da qualidade da água subterrânea relativo à concentração salina e de como ela está espacialmente

distribuída, é necessário ao planejamento da exploração e ao manejo das águas do aquífero, a fim de garantir sua sustentabilidade e prevenir a degradação dos recursos hídricos.

Objetivou-se, com este trabalho, estudar a variabilidade espaço-temporal da condutividade elétrica da água subterrânea utilizada na irrigação em vale aluvial no semiárido pernambucano, para cujo fim foram aplicadas técnicas estatísticas descritivas e geoestatísticas para identificação dos padrões de variabilidade e dependência espacial da condutividade elétrica, visando ao mapeamento da salinidade da água na área analisada e à identificação de áreas mais propícias para suporte à irrigação.

## MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo está localizada no município de Pesqueira, região Agreste de Pernambuco, no Assentamento Rural Nossa Senhora do Rosário, situada entre as coordenadas geográficas 8° 15' e 8° 30' de Latitude Sul, 31° 45' e 37° 00' de Longitude Oeste de Greenwich. A precipitação média anual é de 730 mm. Dados obtidos da estação climatológica de Pesqueira registram uma evapotranspiração potencial de referência, estimada por Tanque Classe A, de 1683 mm anual (Montenegro & Montenegro, 2006).

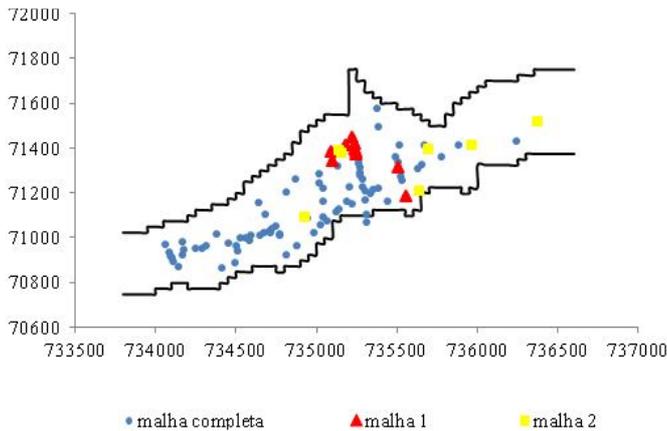
A agricultura é praticada em pequena escala na área, utilizando-se irrigação com águas subterrâneas através principalmente da aspersão e microaspersão. De forma geral, os agricultores praticam a irrigação de maneira empírica não havendo, portanto, controle da lâmina aplicada.

As principais culturas exploradas nos lotes, são: pimenta (*Capsicum* spp), cenoura (*Daucus carota* L.), beterraba (*Beta vulgaris*), repolho (*Brassica oleracea* L. var. *capitata* L.), pimentão (*Capsicum annuum*) e tomate (*Lycopersicon esculentum*), todas com sistema radicular raso e duas a três colheitas por ano (Montenegro & Montenegro, 2006).

O aquífero aluvial sobre o qual a área estudada está assentada, pertence a uma bacia hidrográfica relativamente plana. O aquífero estudado possui espessura média em torno de 10 m, cerca de 3 km de extensão e 300 m de largura e um declive topográfico natural de aproximadamente 0,3% (Oeste-Leste) (Montenegro et al., 2003), induzindo um fluxo subterrâneo natural na mesma direção e sentido.

O vale possui uma rede de poços e piezômetros utilizados para o monitoramento da água subterrânea. Na análise deste trabalho foram usados 33 poços tipo Amazonas e 77 piezômetros. A Figura 1 mostra a localização dos piezômetros e poços instalados. Os triângulos indicam os pontos em que são observados valores extremos nos anos de 2007 a 2009 e os quadrados a localização dos valores extremos apenas em 2009.

Para análise dos padrões de variabilidade foram selecionados os meses de abril, julho e outubro dos anos de 2007, 2008 e 2009. O mês de abril está no meio da estação chuvosa, o de julho no final da estação chuvosa e o mês de outubro na estação seca. Esses dados foram utilizados na análise estatística e geoestatística, a fim de serem observados seus comportamentos, conforme o regime pluviométrico.



Obs.: Malha 1: valores extremos nos anos de 2007 a 2009, Malha 2: valores extremos em 2009 (coordenadas UTM)

**Figura 1.** Mapa da localização dos piezômetros, poços e cacimbões

Os dados foram analisados de acordo com a estatística clássica, para verificação de seu comportamento quanto às medidas estatísticas de posição e de variabilidade. De acordo com os valores do coeficiente de variação (CV), a variabilidade foi classificada, segundo Warrick & Nielsen (1980), em baixa ( $CV \leq 12\%$ ); média ( $12 < CV \leq 60\%$ ) e alta variabilidade ( $CV > 60\%$ ).

Utilizou-se análise de variância a nível de 5% de probabilidade para verificar a diferença entre as condutividades elétricas em função do regime pluviométrico (abril - estação chuvosa; julho - final da estação chuvosa e outubro - estação seca) utilizando-se o programa estatístico SAS.

Os dados discrepantes foram eliminados com base no critério de Hoaglin et al. (1992), que considera discrepantes aqueles dados abaixo do limite inferior ( $L_i$ ) ou acima do limite superior ( $L_s$ ), respectivamente, estimados pelas Eq. 1 e 2:

$$L_i = Q_i - 1,5Ap \tag{1}$$

$$L_s = Q_s + 1,5Ap \tag{2}$$

em que:  $L_i$  e  $L_s$  são os limites inferior e superior;  $Q_i$  e  $Q_s$  são os quartis inferior e superior e  $Ap$  é amplitude entre o 1 e o 3 quartil.

Na análise descritiva também foi avaliada a distribuição dos dados em relação à distribuição Normal, utilizando-se o teste de Kolmogorov-Smirnov. A aderência à distribuição Normal pode ser um indicativo de que as medidas de tendência central não são influenciadas por valores atípicos que possam contribuir para a existência de tendência nos dados.

Para a análise geoestatística utilizou-se a ferramenta geoestatística GEO-EAS. A dependência espacial foi avaliada através do semivariograma clássico construído a partir da estimativa das semivariâncias, dada pela Eq.3 (Journel, 1989).

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^n [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \tag{3}$$

em que:  $\hat{\gamma}(h)$  é o valor estimado da semivariância dos dados experimentais,  $Z(x_i + h)$  e  $Z(x_i)$  são os valores observados da variável regionalizada e  $N(h)$  o número de pares de valores medidos, separados por uma distância  $h$  (Landim, 2003)

Antes de proceder ao ajuste do semivariograma investigou-se a condição de estacionaridade dos dados, que considera o campo estatisticamente homogêneo, ou seja, a função que descreve o comportamento da variável depende apenas da distância de separação entre os pontos de amostragem e não das coordenadas espaciais, fornecendo estimativas não tendenciosas para o conjunto total de valores (Landim, 2003).

Quando verificada a existência da tendência, ela foi removida usando-se um ajuste polinomial para os valores da propriedade em função das coordenadas e se obtendo o resíduo pela diferença entre o valor medido e o estimado pelo polinômio, em cada ponto. Os resíduos passam a ser a variável regionalizada que possui, localmente, médias iguais a zero (Landim, 2003). O semivariograma pode, então, ser ajustado para os resíduos.

De posse do semivariograma experimental procedeu-se ao ajuste dos dados a um modelo teórico e se testaram os modelos exponencial, gaussiano e esférico. O ajuste matemático possibilitou definir os seguintes parâmetros: efeito pepita ( $C_0$ ), alcance da dependência espacial ( $A$ ) e patamar ( $C_0 + C_1$ ). São apresentados, a seguir, os três modelos teóricos considerados (Eq 4, 5 e 6):

- Modelo Exponencial:

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1 \left[ 1 - e^{-\frac{h}{A}} \right] \quad h \neq 0 \tag{4}$$

- Modelo Gaussiano

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1 \left[ 1 - e^{-\left(\frac{h^2}{A^2}\right)} \right] \quad h \neq 0 \tag{5}$$

- Modelo Esférico

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1 \left[ 1,5 \frac{h}{A} - 0,5 \left( \frac{h}{A} \right)^3 \right] \quad 0 < h < A \tag{6a}$$

e

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1 \quad h > A \tag{6b}$$

Após o ajuste fez-se a “validação cruzada”, cujo procedimento foi executado utilizando-se o GEO-EAS.

Após a validação do semivariograma executou-se a krigagem dos dados de condutividade elétrica. Neste trabalho se utilizou a krigagem universal, calculada através do software GEO-EAS. Obtiveram-se os mapas de distribuição espacial utilizando-se o programa Surfer.

No tocante ao grau de dependência espacial utilizou-se a classificação proposta por Cambardella et al. (1994), em que se utiliza a relação entre o efeito pepita e o patamar do semivariograma ajustado, para classificar a dependência espacial em forte, moderada ou fraca. Valores inferiores a 25% caracterizam forte dependência espacial, entre 25 e 75% moderada, enquanto acima de 75%, fraca dependência.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 são apresentados os resultados das medidas estatísticas da condutividade elétrica nos meses de abril, julho e outubro dos anos 2007, 2008 e 2009. Pode-se observar que a diferença entre o valor médio e o mediano é acentuada. Verifica-se que a média é cerca de 45,5% maior que a mediana, indicando que os valores não se encontram distribuídos simetricamente, em torno da média e da mediana.

A amplitude de variação dos dados é elevada, evidenciando uma extensa faixa de salinidades. Observa-se que o valor máximo da condutividade elétrica chega a ser até 226 vezes maior que o valor mínimo, fato constatado no mês de julho de 2009. Os dados apresentam desvio padrão relativamente alto comparado com as respectivas médias, reflexo da alta dispersão dos valores com relação à média. A observação é confirmada pelos valores de coeficiente de variação, os quais podem ser classificados, segundo Warrick & Nielsen (1980), em altos.

O valor alto e positivo do coeficiente de assimetria nos dados de condutividade elétrica evidencia que a distribuição é não-simétrica, contribuindo para caracterizar a distribuição como não-Normal, condição esta ainda reforçada pelo elevado coeficiente de curtose.

Calcularam-se as medidas estatísticas considerando-se o conjunto completo de dados, que podem ter sido influenciados pela presença de valores extremos, ou seja, valores muito acima ou muito abaixo da maioria observada. Um total de 10 piezômetros apresentou valores extremos nos três anos, enquanto ao total, 7 piezômetros apresentaram valores extremos apenas no ano de 2009. Observando a Figura 1 percebe-se uma

clara concentração dos pontos cuja condutividade elétrica apresenta valores elevados, sinalizando ser esta uma área na qual ocorre concentração de sais, tanto no solo quanto na água subterrânea.

Usualmente, são considerados dados discrepantes aqueles que diferem significativamente dos pontos próximos a ele, indicando ocorrência de processo físico muito diferente dos vizinhos, o que não ocorre, entretanto, com a condutividade elétrica da água do aquífero em estudo, ou seja, os piezômetros cuja análise da água apresentou valores extremos, possuem valores coerentes aos vizinhos, o que permite concluir que os referidos valores, embora sejam muito elevados em relação à média, fazem parte do mesmo fenômeno em estudo.

Montenegro et al. (2001) verificaram que esta região de maior acúmulo de sais ocorre perto da confluência entre dois riachos, Ipaneminha e Mimoso, e que as menores concentrações de sais são observadas nas zonas de recarga preferencial à montante desta área. Os mesmos autores constaram que a condutividade elétrica é influenciada pelas características pedológicas do solo, isto é, a região de maior concentração iônica coincide com a área em que a textura do solo é mais fina, reduzindo a lavagem de sais.

Pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, os resultados de normalidade são mostrados na Tabela 1 e confirmam que os dados não são normalmente distribuídos; no entanto, para proceder à análise de dependência espacial é preferível que os dados apresentem distribuição Normal, motivo pelo qual se procedeu à filtragem dos dados, segundo o critério de Hoaglin et al. (1992), já apresentado.

Os piezômetros cujos valores de condutividade elétrica foram filtrados se diferenciam pouco a cada ano, sendo retirados de oito a dez pontos por ano. A faixa de variação dos dados filtrados foi de 1,96 a 20,70 dS m<sup>-1</sup>, em 2007; de 2,10 a 19,95 dS m<sup>-1</sup> em 2008 e de 2,27 a 29,43 dS m<sup>-1</sup> em 2009.

Os dados filtrados foram adotados para a estimativa do semivariograma médio da área em estudo. Para a krigagem os dados discrepantes foram recolocados uma vez que, embora sejam divergentes da média, eles são reais, mantendo o mapeamento o mais fiel possível às condições de campo.

**Tabela 1.** Estatística descritiva da condutividade elétrica (dS.m<sup>-1</sup>) da água subterrânea e total mensal precipitado em diferentes épocas

	2007			2008			2009		
	Abr	Jul	Out	Abr	Jul	Out	Abr	Jul	Out
Média	1,58	1,62	1,96	1,75	2,19	1,87	2,04	1,92	2,02
Mediana	0,75	0,74	0,89	0,79	1,13	0,86	0,97	0,73	0,88
Mínimo	0,23	0,42	0,56	0,12	0,35	0,53	0,42	0,12	0,23
Máximo	16,80	18,00	20,10	17,40	19,90	17,10	29,40	27,10	26,70
Amplitude	16,60	17,90	20,10	17,30	19,60	16,60	29,00	27,00	26,50
Variância da amostra	8,50	9,91	13,00	11,20	12,60	11,20	17,90	16,10	18,00
Desvio padrão	2,92	3,15	3,61	3,34	3,55	3,35	4,23	4,01	4,25
CV (%)	185,00	195,00	184,00	191,00	162,00	179,00	208,00	208,00	211,00
Coeficiente de curtose	16,20	17,80	15,40	12,90	13,40	13,10	25,40	23,40	18,10
Coeficiente de assimetria	4,08	4,30	4,00	3,72	3,69	3,77	4,85	4,60	4,16
D (KS)*	0,38	0,37	0,43	0,39	0,36	0,38	0,40	0,36	0,39
KS**	0,14	0,15	0,14	0,15	0,15	0,15	0,15	0,16	0,15
Número de amostras	94,00	84,00	90,00	85,00	86,00	86,00	82,00	77,00	80,00
Pluviometria (mm)	63,40	55,50	0,00	133,60	92,40	54,50	213,90	0,00	9,60

\* D (KS) = máx [F(X) - G(X)], em que F(X) = P(X < x) e G(X) são as frequências relativas acumuladas dos valores observados

\*\* Distribuição normal pelo teste de KS ao nível de 5% de probabilidade

**Tabela 2.** Medidas estatísticas para a condutividade elétrica ( $\text{dS m}^{-1}$ ) em diferentes épocas, após filtragem dos dados e transformação logarítmica

	2007			2008			2009		
	Abr	Jul	Out	Abr	Jul	Out	Abr	Jul	Out
Média	0,78	0,78	0,980	0,78	1,23	0,92	1,01	0,75	0,86
Mediana	0,69	0,72	0,865	0,75	1,01	0,84	0,90	0,60	0,77
Mínimo	0,23	0,42	0,560	0,12	0,35	0,53	0,42	0,12	0,23
Máximo	1,95	1,63	2,330	1,84	3,28	2,05	1,92	2,20	1,95
Amplitude	1,72	1,21	1,770	1,72	2,93	1,52	1,50	2,08	1,72
Variância	0,17	0,09	0,110	0,17	0,37	0,10	0,15	0,28	0,16
CV %	52,40	38,50	33,40	-53,40	49,90	34,60	38,10	71,20	45,60
Desvio padrão	0,41	0,30	0,330	0,42	0,61	0,32	0,38	0,53	0,40
Coefficiente de assimetria	0,02	0,62	0,710	-0,81	1,17	0,53	0,54	-0,40	1,05
Coefficiente de curtose	0,22	-0,08	-0,310	4,36	1,42	-0,57	-0,48	1,05	0,98
D (KS)*	0,11	0,15	0,140	0,15	0,14	0,15	0,12	0,09	0,12
KS**	0,15	0,16	0,150	0,16	0,16	0,16	0,16	0,17	0,15
Número de variáveis	86,00	74,00	82,00	77,00	78,00	77,00	72,00	66,00	70,00

\* D (KS) =  $\max [F(X) - G(X)]$ , em que  $F(X) = P(X < x)$  e  $G(X)$  são as frequências relativas acumuladas dos valores observados

\*\* Distribuição normal pelo teste de KS a nível de 5% de probabilidade

A Tabela 2 contém o resumo estatístico da condutividade elétrica após a filtragem dos dados, procedimento que não foi suficiente para normalizar os dados, sendo oportuna, portanto, a transformação logarítmica, atingindo-se, assim, a log-normalidade, com exceção dos meses de julho/08, abril/09 e outubro/09, que apresentaram distribuição Normal após a filtragem dos valores extremos.

Pode-se observar que os valores da média e mediana estão próximos entre si. A amplitude de variação dos dados apresenta-se bem menos acentuada quando comparada com a dos respectivos valores de média e mediana; os coeficientes de variação podem, então, ser classificados como de média variação, com exceção do mês de julho/09, que ainda apresentou alta variação.

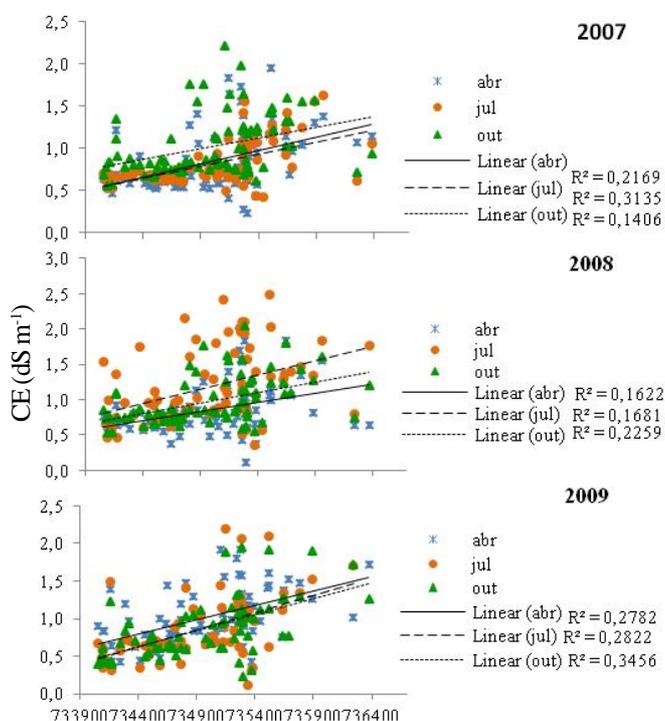
Esses dados são um indicativo de que os valores se encontram melhor distribuídos em torno da média. O teste de Kolmogorov-Smirnov comprova que os dados seguem os pressupostos exigidos pela distribuição Normal.

Além da normalidade dos dados é importante analisar a presença de tendências que influencia a análise geoestatística. Com este objetivo realizou-se a análise através de polinômio. Os resultados com os respectivos coeficientes de correlação são mostrados na Figura 2.

A tendência, mesmo que reduzida, explicitada pelos coeficientes de correlação das regressões lineares, pode levar à não estacionaridade dos dados, visto que o valor da média da variável é função da posição longitudinal no espaço. Uma forma de se analisar os dados neste contexto, é separando, de cada conjunto de dados, o componente sistemático e se procedendo à análise geoestatística dos resíduos resultantes.

Na Figura 3 estão os resíduos obtidos após a aplicação de um polinômio quadrático. Constata-se, visualmente, que a tendência já descrita não mais se faz presente, tornando mais evidente a estacionaridade de primeira ordem das distribuições.

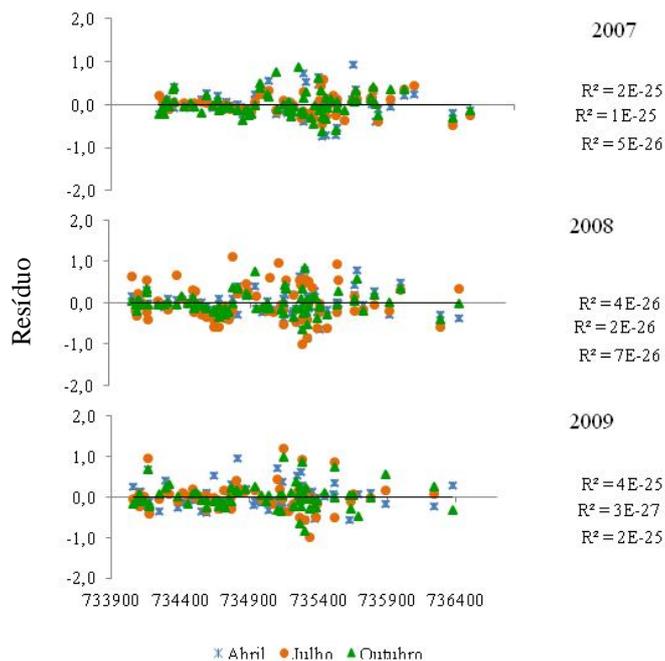
Foram construídos, então, os semivariogramas escalonados pela variância dos valores de resíduos obtidos, os quais são mostrados na Figura 4. Pode-se observar que a variância das amostras foi subestimada nos meses de abril/2007, julho/2009 e agosto/2009, devido ao fato das semivariâncias escalonadas apresentarem valores acima da unidade, nesses meses. Tais



**Figura 2.** Distribuição dos valores de condutividade elétrica da água longitudinalmente ao longo do vale aluvial

comportamentos foram encontrados também por Souza et al. (2008a), Souza et al. (2008b), Lima et al. (2008) e Souza et al. (2006), e se devem às características implícitas do conjunto de dados estudados, que apresentam alta variação.

Na Figura 4  $C_0$  representa o efeito pepita,  $C_0 + C_1$  o patamar e "Alc" o alcance do modelo. As semivariâncias experimentais foram estimadas utilizando-se a Eq 3. Foram ajustados os modelos exponencial, gaussiano e esférico. Os parâmetros utilizados no ajuste de cada semivariograma e o resultado da validação cruzada, estão contidos na Tabela 3. A condutividade elétrica apresenta uma estrutura de dependência espacial na área estudada com alcances que variaram de 130 a 297 m. A relação entre o efeito pepita e o patamar dos semivariogramas variou de 32,1 a 62,5%; portanto, a dependência espacial pode ser considerada moderada, em todos os casos.

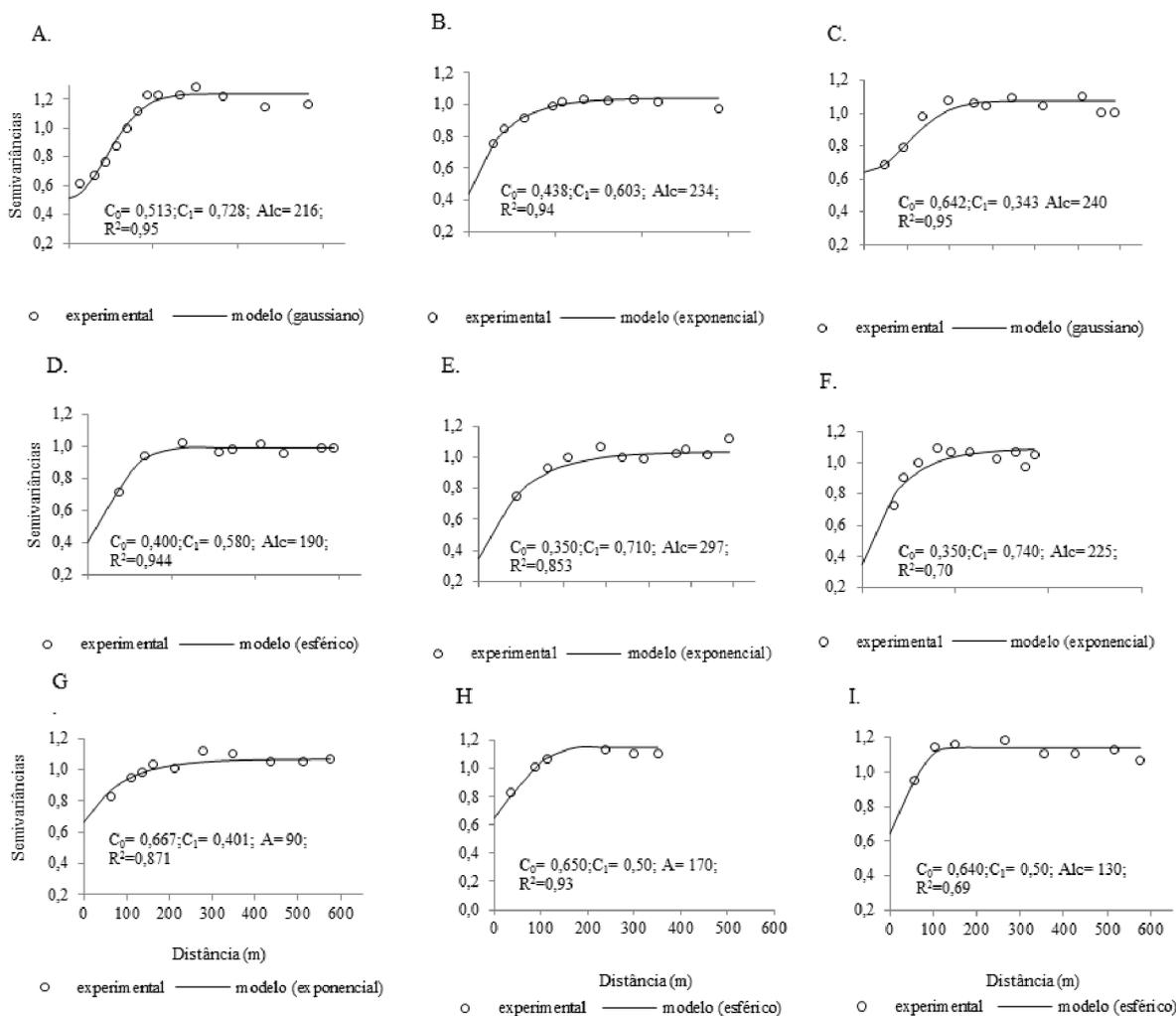


**Figura 3.** Distribuição dos valores dos resíduos obtidos após a remoção da tendência

Souza et al. (2006) obtiveram, trabalhando na mesma área com valores agrupados de condutividade elétrica da água subterrânea, em três períodos, de acordo com o regime pluviométrico, forte dependência espacial nos dois períodos mais úmidos e moderada dependência no período seco. Nesta pesquisa não foram utilizadas médias das condutividades, mas, sim, os resíduos das condutividades elétricas. Já Souza et al. (2006) utilizaram o logaritmo da média da condutividade elétrica por período, o que pode ter contribuído para uma variabilidade menor do conjunto de dados e, portanto, para uma dependência espacial mais forte da condutividade elétrica; apesar disto, em seu trabalho com valores de condutividade elétrica da água subterrânea no mês de maio de 2000, Montenegro et al. (2001) verificaram semivariogramas com moderada dependência espacial.

Os modelos ajustados foram utilizados na confecção de mapas de isolinhas da condutividade elétrica (Figura 5), através da técnica de krigagem. Observa-se que a parte oeste do vale, de textura mais grosseira, é onde predominam as menores condutividades elétricas, particularmente por ser situada à montante da área irrigada.

Nota-se que as isolinhas mais próximas indicam regiões de maior variabilidade. Esta região está situada na parte central



**Figura 4.** Semivariogramas escalonados pelas variâncias dos resíduos: abr/07(A); jul/07(B); out/07(C); abr/08(D); jul/08(E); out/08(F); abr/09(G); jul/09(H); out/09(I)

Tabela 3. Parâmetro de ajuste do semivariograma

Mês/Ano	C <sub>0</sub>	C <sub>1</sub>	Pat.	Alc.	Modelo ajustado	Validação cruzada	
						Média	r <sup>2</sup> resíduo
abr/07	0,51	0,73	1,24	216	gaussiano	-0,03	1,00
jul/07	0,44	0,60	1,04	234	exponencial	0,04	0,93
out/07	0,64	0,43	1,08	240	gaussiano	-0,04	1,04
abr /08	0,40	0,58	0,98	190	esférico	0,01	1,12
jul/08	0,35	0,71	1,06	297	exponencial	-0,03	1,07
out/08	0,35	0,74	1,09	225	exponencial	-0,02	0,92
abr /09	0,67	0,40	1,07	270	exponencial	0,01	1,03
jul/09	0,65	0,50	1,15	170	esférico	-0,02	0,99
out/09	0,64	0,50	1,14	130	esférico	-0,01	0,94

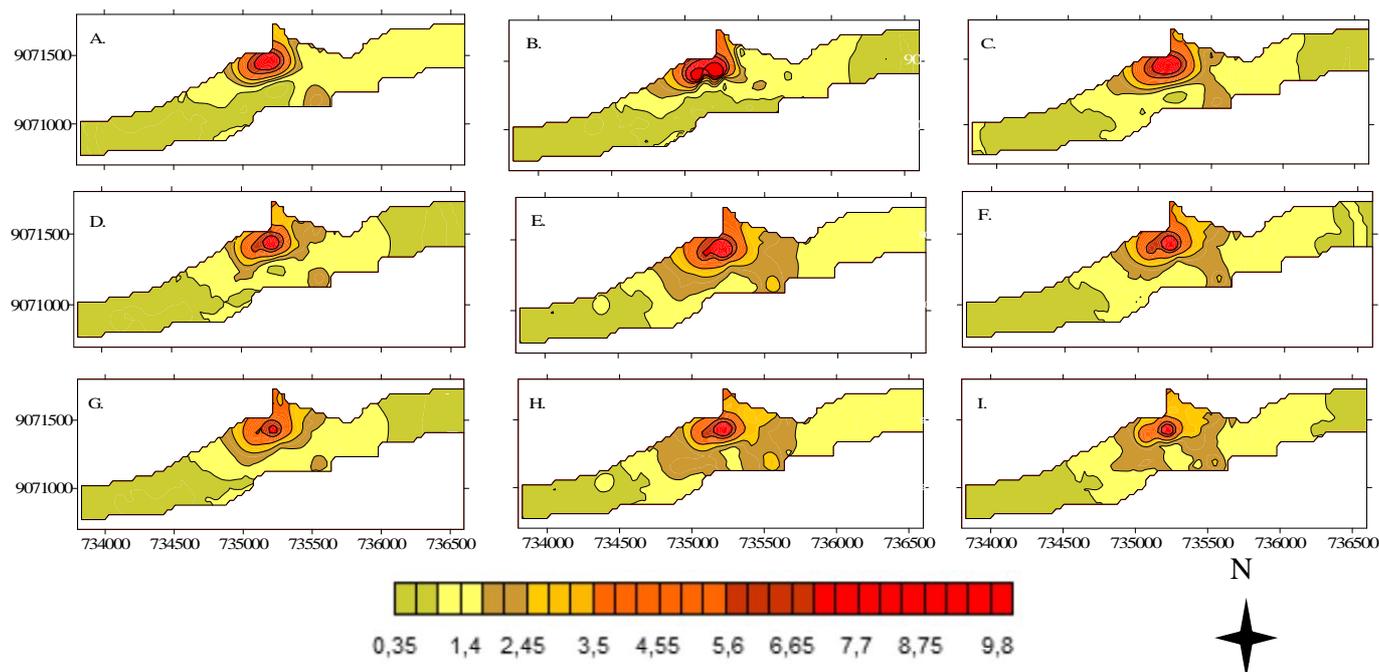


Figura 5. Mapa de isolinhas da condutividade elétrica (CE) da água subterrânea em  $\text{dS m}^{-1}$ , (A) abr/07; (B) jul/07; (C) out/07; (D) abr/08; (E) jul/08; (F) out/08; (G) abr/09; (H) jul/09 e (I) out/09

do vale aluvial (Figura 2 e 5), onde a textura do solo é mais fina e a camada de impedimento se encontra mais próxima à superfície do solo. O nível da água nesta região é, em média, um metro, o que concorre para a salinização secundária em virtude da ascensão capilar. Rabemanana et al. (2005) também notaram alta variabilidade nos valores de condutividade elétrica da água subterrânea de um aquífero na região sul de Madagascar e, ainda, que as áreas de maior concentração de sais estavam associadas a regiões planas, de textura argilosa, com lençol subterrâneo próximo à superfície do terreno, onde o fluxo de água é reduzido. Estudos anteriores de Montenegro et al. (2001) indicam que dita região estudada, é influenciada pelo fluxo subterrâneo regional e por contribuições de escoamento das encostas do vale que alimentam o freático, inclusive durante a estação seca, fato que também contribui para o aumento da salinidade, tanto do solo quanto da água na região central do vale aluvial, uma vez que carrega parte dos sais presentes no solo das encostas para esta região específica do vale. Montenegro & Montenegro (2006) também verificaram maior salinidade do solo nessa área, utilizando krigagem indicadora.

A condutividade elétrica mantém um padrão de distribuição espacial ao longo dos anos, ou seja, as zonas de maior ou

menor concentração de sais não se alteram. Observa-se que as condutividades elétricas que apresentam valores de até  $3,5 \text{ dS.m}^{-1}$  são as que recebem maior influência da precipitação na variação espacial da sua qualidade. As áreas que apresentam águas subterrâneas com condutividade elétrica acima deste valor tendem a não sofrer variações.

Verifica-se, na Figura 5, que o mês de julho tende a apresentar as maiores condutividades elétricas, comportamento que pode ser devido à lavagem de sais da zona não saturada, resultante de chuvas dos meses anteriores. O comportamento sazonal da condutividade elétrica foi observado por outros autores, como Lemos et al. (2010), em açude, e Zaccaria et al. (2010) e Burte et al. (2011), em aquífero em área irrigada. Também é constatado o aumento da concentração de sais na água subterrânea, com o tempo, através do aumento da área, que apresenta condutividade elétrica entre  $1,4$  e  $2,45 \text{ dS m}^{-1}$  sendo este um indicativo de que pode estar ocorrendo degradação por salinização da água subterrânea.

De acordo com Ayers & Westcot (1999), as águas de condutividade elétrica acima de  $0,7 \text{ dS m}^{-1}$  já apresentam moderado potencial de salinização do solo quando usadas na irrigação. O uso contínuo dessas águas sem manejo adequado

pode estar contribuindo para o aumento da concentração de sais no solo que, com as chuvas e/ou irrigação, são carreados para zona saturada do aquífero, ocasionando o aumento da salinidade das águas subterrâneas. Lemos et al. (2010) também notaram, estudando a qualidade da água na Lagoa Apodi, RN, aumento na condutividade elétrica da água em curto intervalo de tempo, em apenas dois anos de estudo e citam, como prováveis causas deste aumento, a elevada evaporação da região, a diminuição do nível d'água e as atividades antrópicas desenvolvidas nas margens da lagoa.

Os resultados da análise de variância, que teve por objetivo verificar a existência de diferenças significativas, entre as condutividades elétricas médias diante dos diferentes regimes pluviométricos (abril - estação chuvosa, julho - final da estação chuvosa e outubro - estação seca), foram calculados a partir do logaritmo da condutividade elétrica e são mostrados na Tabela 4.

**Tabela 4.** Análise da variância por piezômetro e meses de diferentes regimes pluviométricos

Fonte de variação	F	Pr > F
Piezômetros	44,26	0,0001
Meses	2,51	0,0833
Piezômetro x Meses	0,97	0,5585

Constatou-se que a diferença da condutividade elétrica entre os piezômetros é significativa mas não houve diferenças significativas entre os meses nem na interação piezômetro x meses, ou seja, existe diferença nas leituras de condutividade elétrica entre os piezômetros; no entanto, não existe diferença significativa nas condutividades elétricas entre os meses de diferentes regimes pluviométricos.

## CONCLUSÕES

1. A condutividade elétrica da água possui variabilidade média a alta, com dependência espacial moderada.
2. As condutividades elétricas de até aproximadamente 3,5  $\text{dS m}^{-1}$ , são as que recebem maior influência da precipitação na variação da sua qualidade; apesar disto, não se constataram diferenças significativas na condutividade elétrica entre os meses de diferentes regimes pluviométricos.
3. Os mapas de isolinhas permitiram verificar que as áreas de maior ou menor concentração de sais não se alteram entre as estações seca e chuvosa e, por sua vez, a condutividade elétrica da água subterrânea está aumentando ao longo dos anos.
4. A condutividade elétrica tende a aumentar ao longo da direção longitudinal do vale, nas áreas onde o nível da água está mais próximo à superfície do solo.

## AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pela concessão de bolsa de estudo e dos recursos necessários ao desenvolvimento deste trabalho; à Universidade Federal Rural de Pernambuco, pela logística e licença para a realização do trabalho.

## LITERATURA CITADA

- Amorim, J. R. A.; Cruz, M. A. S.; Resende, R. S. Qualidade da água subterrânea para irrigação na bacia hidrográfica do Rio Piauí, em Sergipe. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, p.804-811, 2010.
- Andrade Júnior, A. S.; Silva, E. F. F.; Bastos, E. A.; Melo, F. B.; Leal, C. M. Uso e qualidade da água subterrânea para irrigação no semiárido piauiense. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.10, p.873-880, 2006.
- Ayers, R. S.; Westcot, D. W. A qualidade da água na agricultura. 2.ed. Campina Grande: UFPB, 1999. Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 29.
- Burte, J. D. P.; Coudrain, A.; Marlet, S. Use of water from small alluvial aquifers for irrigation in semi-arid regions. *Revista Ciência Agrônômica*, v.42, p.635-643, 2011.
- Cambardella, C. A.; Moorman, T. B.; Novak, J. M.; Parkin, T. B.; Karlen, D. L.; Turco, R. F.; Kornopka, A. E. Field scale variability of soils properties in central Iowa Soils. *Soil Science Society American Journal*, v.58, p.1501-1511, 1994.
- Costa, A. M. B.; Melo, J. G. E.; Silva, F. M. Aspectos da salinização das águas do aquífero cristalino no estado do Rio Grande do Norte, nordeste do Brasil. *Revista Águas Subterrâneas*, v.20, p.67-82, 2006.
- Fernandes, J. G.; Freire, M. B. G. S.; Cunha, J. C.; Galvêncio, J. D.; Correia, M. M.; Santos, P. R. Qualidade físico-química das águas utilizadas no Perímetro Irrigado Cachoeira II, Serra Talhada, Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v.4, p.27-34, 2009.
- Gonçalves, A. C. A.; Folegatti, M. V.; Mata, J. D. V. Análise exploratória e geoestatística da variabilidade de propriedades físicas de um Argissolo Vermelho. *Acta Scientiarum*, v.23, p.1149-1157, 2001.
- Hoaglin, D. C.; Mosteller, F.; Tukey, J. W. Análise exploratória de dados: Técnicas robustas. Lisboa: Edições Salamandra, 1992. 446p.
- Journel, A. G. Fundamentals of geostatistics in five lessons. Washington: American Geophysical Union, 1989. 40p.
- Landim, P. M. B. Análise estatística de dados geológicos. 2.ed. São Paulo: UNESP, 2003. 253p.
- Lemos, M.; Ferreira Neto, M.; Dias, N. da S. Sazonalidade e variabilidade espacial da qualidade da água na Lagoa do Apodi, RN. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, p.155-164, 2010.
- Lima, J. S. S.; Oliveira, P. C.; Oliveira, R. B.; Xavier, A. C. Métodos geoestatísticos no estudo da resistência do solo à penetração em trilha de tráfego de tratores na colheita de madeira. *Revista Árvore*, v.32, p.931-938, 2008.
- Medeiros, J. F.; Lisboa, R. A.; Oliveira, M.; Silva Júnior, M. J.; Alves, L. P. Caracterização das águas subterrâneas usadas para irrigação na área produtora de melão da Chapada do Apodi. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.7, p.469-472, 2003.
- Montenegro, A. A. A.; Montenegro, S. M. G. L. Variabilidade espacial de classes de textura, salinidade e condutividade hidráulica de solos em planície aluvial. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.10, p.30-37, 2006.

- Montenegro, S. M. G. L.; Montenegro, A. A. A.; Mackay, R.; Oliveira, A. S. C. de. Dinâmica hidro-salina em aquífero aluvial utilizado para agricultura irrigada familiar em região semiárida. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.8, p.85-92, 2003.
- Montenegro, S. M. G. L.; Montenegro, A. A. A.; Ribeiro, M. R.; Corrêa, M. M.; Almeida, T. A.; Maia, F. M. V. L. Análise da variabilidade espacial da salinidade em área irrigada e do nível d'água em aluvião sob uso agrícola na região semiárida do nordeste brasileiro. In: *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 14, 2001, Aracaju. Anais... Aracaju: ABRH, 2001. CD-Rom
- Rabemanana, V.; Violette, S.; Marsily, G.; Robain, H.; Deffontaines, B.; Andrieux, P.; Bensimon, M.; Parriaux, A. Origin of the high variability of water mineral content in the bedrock aquifers of Southern Madagascar. *Journal of Hydrology*, p.143-156, 2005.
- Ribeiro, G. M.; Maia, C. E; Medeiros, J. F. de. 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, p.15-22, 2005.
- Souza, E. R.; Montenegro, A. A. A.; Andrade, T. S.; Montenegro, S. M. G. L. Análise temporal da estrutura de dependência espacial da salinidade em aluvião no semiárido. In: *Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola*, 35, 2006, João Pessoa. Anais... João Pessoa: SBEA, 2006. CD Rom
- Souza, G. S.; Lima, J. S. S.; Silva, S. A. Variabilidade espacial do fósforo, potássio e da necessidade de calagem numa área sob pastagem. *Revista Ciência Agronômica*, v.39, p.384-391, 2008a.
- Souza, G. S. Lima. J. S. S.; Silva, S. A.; Oliveira, R. B. Variabilidade espacial de atributos químicos em um Argissolo sob pastagem. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v.30, p.589-596, 2008b.
- Warrick, A. W.; Nielsen, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field In: Hillel, D. *Applications of soil physics*. New York: Academic. 1980, p.319-344.
- Zaccaria, D.; Oueslati, I.; Neale, C. M. U.; Lamaddalena, N.; Vurro, M.; Pereira, L. S. Flexible delivery schedules to improve farm irrigation and reduce pressure on groundwater: A case study in southern Italy. *Irrigation Science*, v.28, p.257-270, 2010.