

Espacialização da salinidade e sodicidade em cambissolo cultivado com manga irrigada

Spatialization of salinity and sodium in cambisol cultivated with irrigated mango trees

Antônio Aldísio Carlos Júnior¹, Jair José Rabelo de Freitas², Ítalo Sorac Rafael Queiroz¹, Luís Cesar de Aquino Lemos Filho³, Marcílio Macêdo Torres⁴

RESUMO: Em áreas irrigadas, principalmente nas regiões semiáridas, quando o manejo da irrigação é mal conduzido, os solos podem ser salinizados e sodificados, tendo como consequência a diminuição da produtividade agrícola. Assim, o conhecimento da variação espacial dos elementos que condicionam esses processos é de suma importância no planejamento agrícola. Nesse contexto, o presente estudo objetivou mapear a variabilidade espacial da salinidade e sodicidade em área com manga irrigada no Vale do Açu (RN). Para isso, aplicaram-se técnicas estatísticas e geoestatísticas com subsídio dos *softwares* GeoR e Vesper. A grade amostral foi realizada em uma área retangular de 100 m x 64 m (6.400 m²), com pontos distanciados em 16 m x 10 m, totalizando 40 amostras. Foram determinadas as variáveis Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺, pH, CE, PST e RAS. Os resultados indicam que a área tem baixo risco de salinidade e sodicidade, com atributos se comportando de forma heterogênea, exceto o K⁺ e pH que apresentaram baixo coeficiente de variação. A dependência espacial foi classificada fraca para Na⁺, K⁺ e RAS, moderada para os atributos pH, CE e PST e forte apenas para Ca e Mg. O uso da geoestatística mostrou-se uma ferramenta capaz de delimitar as áreas com maiores e menores concentrações em locais não amostrados, contribuindo para o uso racional do solo e água.

Palavras-chave: Degradação do solo. Geoestatística. Manejo do solo e água.

ABSTRACT: When irrigation management is not properly conducted in irrigation areas, especially in semi-arid regions, soil may be salinized and sodiumized, with decrease in agricultural productivity. Investigation of spatial variation of the factors that condition the processes is extremely important in agricultural planning. Current analysis mapped the space variability of salinity and sodiumized in an area with irrigated mango trees in the Vale do Açu (RN), Brazil. Statistical and geostatistical techniques were applied by GeoR and Vesper software. The sampling grid was performed in a rectangular area of 100 m x 64 m (6,400 m²), points distanced 16 m x 10 m, totaling 40 samples. Variables Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺, pH, CE, PST and RAS were determined. Results indicate that the area has low risk in salinity and sodiumization. Attributes behaved heterogeneously, with the exception of K⁺ and pH presenting a low variation coefficient. Spatial dependence was weak for Na⁺, K⁺ and RAS, moderate for attributes pH, CE and PST, and strong for Ca and Mg only. Geo-statistics proved to be a tool capable of delimiting the areas with higher and lower concentrations in unsampled sites, contributing to the rational use of soil and water.

Keywords: Geo-statistics. Soil degradation. Soil and water management.

Autor correspondente:

Antônio Aldísio Carlos Júnior: aldisio.carlos@ufersa.edu.br

Recebido em: 31/08/2018

Aceito em: 25/07/2020

INTRODUÇÃO

A salinização do solo é um problema global, que ameaça a produtividade e a sustentabilidade agrícola, especialmente em regiões áridas e semi-áridas (XU; DU; ZHANG, 2019). Nessas condições, a prática da irrigação permanente, quando mal conduzida, pode resultar em salinidade e sodicidade do solo, restringindo severamente a atividade fisiológica e a capacidade produtiva das culturas (KIM *et al.*, 2016; YUSUF *et al.*, 2020).

¹ Doutorandos do Programa de Pós-graduação em Manejo de Solo e Água (PPGMSA) da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró (RN), Brasil.

² Mestre em Manejo de Solo e Água (PPGMSA) pela Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró (RN), Brasil.

³ Docente permanente do Programa de Pós-graduação em Manejo de Solo e Água (PPGMSA) da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró (RN), Brasil.

⁴ Instituto de Assistência Técnica e Extensão Rural do Rio Grande do Norte (EMATER), Angicos (RN), Brasil

Em áreas irrigadas do semiárido do Nordeste brasileiro, o processo de salinização tem provocado alterações em características físico-hídricas dos solos, em consequência da ação dispersiva dos sais envolvidos sobre as partículas de solo, tornando-os compactados (RESENDE *et al.*, 2014).

No sentido de buscar estratégias para a sustentabilidade agrícola de áreas com potenciais riscos de salinização e sodificação, o conhecimento da distribuição espacial dos elementos que governam esses processos permite ao produtor melhorar o manejo do solo através da definição de zonas de manejo (RODRIGUES *et al.*, 2018; MINHAS *et al.*, 2020).

Para caracterizar a distribuição da salinidade e sodicidade do solo, várias pesquisas têm utilizado a geoestatística como uma ferramenta eficiente para construção de mapas de variabilidade espacial (AKRAMKHANOV *et al.*, 2014; NIÑEROLA *et al.*, 2017; DINH *et al.*, 2018). A geoestatística pode fornecer uma descrição e uma modelagem de padrões espaciais, previsão em locais não amostrados e avaliação da incerteza dessas previsões usando um conjunto de ferramentas estatísticas (RANJBAR; JALALI, 2016).

Através da geoestatística é possível determinar a dependência espacial das variáveis e mensurar, por meio da krigagem, as concentrações dos sais e das propriedades do solo considerando a proximidade dos pontos amostrados, o que favorece o manejo das áreas cultivadas com aumento da eficiência da aplicação de água e insumos e consequente racionalização de custos (FERREIRA *et al.*, 2016; MUÑOZ-NÁJERA *et al.*, 2020).

A avaliação da dinâmica espacial dos elementos químicos que causam a salinização e sodificação é um instrumento essencial para manejo da água e solo, bem como é uma ferramenta capaz de subsidiar as ações governamentais para tornar os perímetros irrigados sustentáveis e produtivos.

Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo mapear a variabilidade espacial da salinidade e sodicidade em um cambissolo cultivado com manga irrigada no Vale do Açu (RN) por meio de técnicas geoestatísticas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A pesquisa foi conduzida numa fazenda de produção comercial de manga localizada no Lote 68 do Setor III, no Perímetro Irrigado Osvaldo Amorim, no Vale do Açu, no município do Alto do Rodrigues (RN), sob as coordenadas planas em UTM (Sistema Universal Transverso de Mercator) com *datum* de projeção SIRGAS 2000, na latitude 9404004 e longitude 745308 e altitude média de 48 metros (Figura 1).

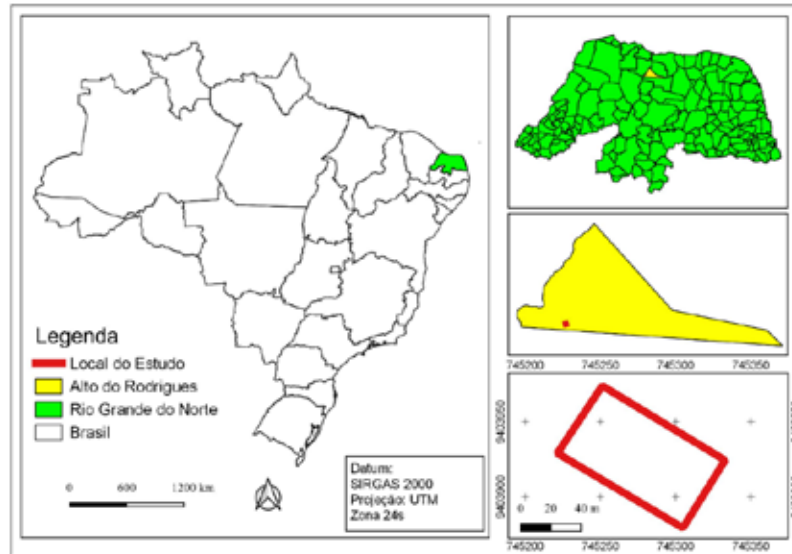


Figura 1. Mapa do município do Alto do Rodrigues (RN), com a localização do experimento.

Fonte: elaborado pelo autor.

O solo da área de trabalho é classificado como cambissolo. O clima do município do Alto do Rodrigues (RN), segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, é do tipo BSw^h (CARMO FILHO; ESPÍNOLA SOBRINHO; MAIA NETO, 1991), que significa: clima seco, com evapotranspiração potencial anual superior à precipitação anual; precipitação anual total média compreendida entre 380 e 760 mm; estação chuvosa no verão atrasando-se para o outono; e temperatura média anual do ar > 18 °C.

697

2.2 AMOSTRAGEM

Considerando o efeito bordadura, estabeleceu-se uma malha retangular de 100 m x 64 m (6.400 m²), deixando no mínimo duas fileiras com plantas ao redor do experimento. Na área delimitada existia um total de 133 plantas, porém a amostragem foi realizada alternando-se as fileiras e plantas dentro de cada fileira selecionada, ficando os pontos amostrais (plantas) distanciados de 16 m x 10 m, totalizando 40 plantas amostradas (pontos), conforme a Figura 2. Porém, por se tratar de uma área comercialmente explorada desde o ano 2000, existiam pontos amostrais sem nenhuma planta, ou com plantas em estágio de desenvolvimento inicial devido ao replantio (substituição de algumas plantas por motivos diversos).

Essa observação é relevante, visto que esses pontos amostrais podem ter seus conteúdos de água no solo alterados, tanto por causa da diminuição da transpiração (plantas em estádios diferentes) como pelo aumento da evaporação, pois são pontos menos sombreados ou com ausência total de sombreamento, acarretando maior incidência da radiação solar no solo. Sabe-se que a radiação solar é o parâmetro climático de maior influência no processo evaporativo. Com isso, quando o ponto estava sobre uma das situações acima descritas, procedeu-se com o deslocamento do ponto para a planta seguinte na mesma fileira, que apresentava o porte semelhante das demais plantas da área.

O sistema de irrigação existente na área trabalhada era de microaspersão (irrigação localizada). Os emissores (microaspersores) estavam espaçados de 8 m entre fileiras e 5 m entre plantas. A área continha um total de 133 microaspersores, distribuídos em 7 fileiras de plantas, resultando em um microaspersor para cada planta. A água de irrigação era oriunda do Rio Açu, a qual era elevada e transportada por canais, sendo pressurizada em subestação de bombeamento, chegando ao lote com uma pressão de 350 kPa.



Figura 2. Imagem de satélite destacando a área experimental e a distribuição dos pontos amostrais.

Fonte: *Google Earth* (2018) e autor.

2.3 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

Para a caracterização da distribuição espacial da salinidade e sodicidade do solo, foram coletadas 40 amostras indeformadas na profundidade de 0,2 m e avaliados os seguintes elementos e parâmetros: Cálcio (Ca^{2+}), Magnésio (Mg^{2+}), Potássio (K^+), Sódio (Na^+), Potencial Hidrogeniônico (pH), Condutividade Elétrica (CE_a), Percentagem de Sódio Trocável (PST) e Relação de Adsorção de Sódio (RAS).

As concentrações de Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ trocáveis foram extraídas com KCl 1 mol.L⁻¹ na relação solo/extrator de 1:10, e as concentrações de Na^+ trocáveis foram extraídas com o extrator de Mehlich-1 na relação solo/extrator de 1:10. O pH em água foi determinado na relação solo:água de 1:2,5, enquanto a CE_a foi preparada na relação solo/água de 1:5. Ambas as análises foram realizadas conforme a metodologia descrita no manual de análises químicas de solos da EMBRAPA (2009). Para o cálculo da PST e RAS foram empregadas, respectivamente, as Equações 1 e 2.

$$\text{PST (\%)} = \frac{\text{Na}^+ \times 100}{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+} \quad (1)$$

$$\text{RAS} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}}{2}}} \quad (2)$$

Os dados foram avaliados por meio da estatística descritiva obtendo-se a média, mediana, variância, máximo, mínimo, desvio-padrão, assimetria, curtose, coeficiente de variação e teste de normalidade. Para a classificação da variabilidade dos atributos foram adotados os limites de coeficiente de variação (CV) propostos por Warrick e Nielsen (1980), sendo baixa ($\text{CV} < 12\%$), média ($12\% < \text{CV} < 60\%$) e alta ($\text{CV} > 60\%$). A hipótese de normalidade foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk (1965) no *software* GeoR (RIBEIRO JÚNIOR; DIGGLE, 2001).

Após a análise descritiva, os dados foram submetidos à geoestatística em que foi quantificada e classificada a dependência espacial das variáveis. Inicialmente foram estabelecidos os semivariogramas empíricos conforme cálculo da semivariância proposto por Matheron (1963), conforme Equação 3.

$$y(h) = \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (3)$$

em que $N(h)$ é o número de pares de valores experimentais medidos em $[Z(x_i), Z(x_i + h)]$, separados pelo vetor h .

Para o ajuste do semivariograma experimental, utilizaram-se os modelos (a) esféricos, $\gamma(h) = C_0 + C_1 [1,5 (h/A) - 0,5 (h/A)^3]$ para $(0 < h \leq A)$ e $\gamma(h) = C_0 + C_1$ para $h > A$; (b) exponencial, $\gamma(h) = C_0 + C_1 [1 - \exp(-h/A)]$; e (c) gaussiano, $\gamma(h) = C_0 + C_1 [1 - \exp(-h^2/A^2)]$, em que C_0 é o efeito pepita, C_1 é a variância estruturada, “d” é a distância máxima na qual o semivariograma é definido e “A”, o alcance. O melhor ajuste foi definido pelo menor valor da raiz quadrada do erro médio (RQEM), conforme Equação 4.

$$RQEM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \{Z(x_i) - \check{Z}(X_i)\}^2} \quad (4)$$

onde: $Z(X_i)$ é o valor observado, (X_i) é o valor previsto e N é o número de amostras.

O grau de dependência espacial dos semivariogramas ajustados foi avaliado pelo grau de dependência espacial (GD) proposto por Cambardella *et al.* (1994), considerando forte dependência para um $GD < 25\%$, moderada dependência com $25\% < GD < 75\%$ e fraca dependência quando o $GD > 75\%$. O valor de GD é dado pela Equação 5.

$$GD = \left\{ \frac{C_0}{C_0 + C_1} \right\} \times 100 \quad (5)$$

Após a escolha dos modelos e verificadas quais variáveis apresentaram dependência espacial, foi realizada a interpolação por meio da Krigagem Ordinária para obtenção dos valores dos locais não amostrados conforme Equação 6.

$$Z^*(X_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i) \quad (6)$$

em que $z^*(X_0)$ é a variável interpolada, λ_i são os pesos associados aos pontos vizinhos e $Z(x_i)$, o valor da variável no ponto vizinho. Para esses procedimentos geoestatísticos foi usado o *software* GeOR (RIBEIRO JÚNIOR; DIGGLE, 2001), Vesper 1.6 (MINASNY *et al.*, 2006) e para edição dos mapas o QGIS versão 2.18.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A estatística descritiva para as variáveis estudadas encontra-se disposta na Tabela 1, representando os parâmetros dos 40 pontos amostrais. As medidas de tendência central (média e mediana) variaram pouco para a profundidade estudada, indicando uma pequena variação em relação ao valor central.

A variabilidade dos atributos da salinidade e sodicidade de acordo com o coeficiente de variação (CV), proposto por Warrick e Nielsen (1980), teve a maioria dos atributos classificados como de média a alta variação, com exceção do K^+ e pH, apresentando 27,05 e 6,98%, respectivamente. Essa variação é esperada, visto que o solo é um componente heterogêneo que depende de vários fatores de formação. De acordo com Artur *et al.* (2014), os valores elevados de CV sugerem alta heterogeneidade em torno da média entre os atributos químicos nos compartimentos do terreno. Referida heterogeneidade pode ter várias causas, dentre as quais merecem destaque: processos de formação do solo, acúmulo e distribuição das partículas do solo e do fluxo de água na área.

Tabela 1. Parâmetros da estatística descritiva e atributos químicos do solo na área de manga irrigada

Atributos	Estatística descritiva								
	Méd	Medi	Máx	Mín	D.P	Curt	Assi	CV%	W
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	4,28	4,54	15,13	0,00	3,41	3,08	1,36	79,70	ns
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	2,06	1,95	6,37	0,03	1,11	4,94	1,57	53,88	ns
Na ⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,14	0,13	0,32	0,06	0,04	6,33	1,75	31,99	ns
K ⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,66	0,63	1,10	0,38	0,18	-0,02	0,77	27,05	*
pH	6,98	7,02	8,07	5,23	0,49	5,56	-1,34	6,98	ns
CE (ds m ⁻¹)	0,18	0,16	0,37	0,08	0,07	0,28	0,97	39,71	ns
RAS (mmol _c dm ⁻³)	0,85	0,76	1,58	0,28	0,32	0,06	0,83	37,87	ns
PST %	2,54	1,92	7,08	0,41	1,61	1,18	1,32	63,25	ns

Méd - Média; Medi - Mediana; Máx - Máximo; Mín - Mínimo; Curt - Curtose; Assi - Assimetria; D.P - Desvio-Padrão; CV% - coeficiente de variação; W - Teste de Shapiro-Wilk's; * - Distribuição não-normal pelo teste de Shapiro-Wilk's (p-valor < 0,05); ns - Distribuição normal pelo teste de Shapiro-Wilk's (p-valor > 0,05).

Parâmetros do solo com alta variabilidade, como obtidos neste estudo, são potencialmente mais apropriados para serem manejados espacialmente que aqueles uniformemente distribuídos. Por outro lado, o mapeamento de parâmetros do solo com alta variabilidade espacial pode ter menor acurácia que os valores com baixa variabilidade (BERNARDI *et al.*, 2014).

A baixa variação observada para o pH indica uma área mais homogênea para este atributo, sendo que esta variação é devida à reposição de cargas hidrogeniônicas fornecidas pela matéria orgânica aplicada na área propiciando certa estabilidade do pH no solo estudado. Os valores de CE se mostraram baixos, o que indica uso de água de boa qualidade, com baixo nível de salinidade.

A maioria dos atributos não apresentou distribuição normal de acordo com o teste de Shapiro-Wilk's, exceto o K⁺ que foi positivo para o teste. Os outros parâmetros apresentaram coeficientes de assimetria e/ou curtose elevados e, dessa forma, apresentaram distribuição não normal pelo mesmo teste. Apesar de os atributos apresentarem assimetria, esta não foi acentuada, pois os valores de média e mediana, em sua maioria, estão próximos ao banco de dados atendendo às condições de normalidade, ou seja, os valores não são dominados por valores atípicos de distribuição e são mais adequados para uso da geoestatística (LIMA *et al.*, 2014).

Lemos Filho, Ferreira e Lyra (2017) enfatizam que a normalidade dos dados é uma condição desejável para o ajuste dos semivariogramas pela metodologia da máxima verossimilhança, devido ao fato de o ajuste do modelo por essa metodologia não se basear nos pontos do semivariograma e sim nas diferenças dos dados originais.

A Tabela 2 apresenta os parâmetros de ajuste do semivariograma para as variáveis analisadas. Ajustaram-se os modelos para os semivariogramas de acordo com o menor valor da raiz quadrada do erro médio (RQEM), considerando uma distribuição isotrópica porque os semivariogramas direcionais não apresentaram diferenças que justificasse seu uso.

Tabela 2. Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas de alguns atributos químicos do solo em área de manga irrigada

Atributo	Modelo	C ₀	C ₀ +C ₁	A (m)	GD	Class	RMSE
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	Gaussiano	3,6960	16,6360	38,830	22,217	Forte	0,457
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	Esférico	0,0000	1,2780	28,090	0,000	Forte	0,157
Na ⁺ (cmol _c dm ⁻³)	Esférico	0,0015	0,0019	3,531	78,911	Fraco	0,003
K (cmol _c dm ⁻³)	Esférico	0,0262	0,0339	23,142	77,182	Fraco	0,041
pH	Esférico	0,1831	0,2639	57,880	69,369	Moderado	0,316
CE (ds m ⁻¹)	Exponencial	0,0038	0,0060	60,000	65,237	Moderado	0,007
RAS (mmol _c dm ⁻³)	Esférico	0,0953	0,1026	37,281	92,950	Fraco	0,071
PST %	Exponencial	1,5870	3,4330	53,370	46,228	Moderado	0,230

C0 - Efeito pepita; C0 + C1 - patamar; A - Alcance; GD - Grau de dependência espacial (C₁/C₀ + C₁); Class - Classificação; RMSE - erro médio quadrático.

Com exceção do Ca²⁺ (Gaussiano), CE e PST (Exponencial), as demais variáveis se ajustaram ao modelo esférico, corroborando os ajustes feitos por Zonta *et al.* (2014), que estudaram a variação espacial da fertilidade do solo. Resultados semelhantes foram obtidos por Müller *et al.* (2018) ao estudarem a variação espacial dos atributos químicos de um solo do Cerrado, em que os melhores ajustes foram Gaussiano para Ca²⁺ e esférico para pH e K⁺. Dessa forma, ambos os estudos apontam que o modelo esférico é o mais indicado para análise geoestatística da maioria dos atributos do solo.

De acordo com o melhor ajuste, obteve-se o efeito Pepita, Patamar e Alcance, sendo para CE (0,004; 0,006 e 60), RAS (0,095; 0,103 e 37,28) e PST (1,57; 3,43 e 53,37) respectivamente. Essas informações, principalmente do alcance, são importantes para amostragens e para tomada de ações quanto à recuperação de solos salinos, uma vez que tal técnica é capaz de detectar até onde uma propriedade do solo apresenta dependência espacial (CAROLINO *et al.*, 2017).

Diante dos dados do Alcance, observa-se que a malha amostral utilizada foi adequada para representar a dependência espacial da maioria dos elementos estudados, uma vez que o Alcance foi maior que as distâncias entre amostras. A única exceção foi para o Na⁺, com alcance de 3,51 metros, indicando que, para as condições deste estudo, é necessário maior adensamento amostral para uma melhor representação da distribuição espacial desse elemento.

Para Dalchiavon *et al.* (2011), a determinação do Alcance é de suma importância para a agricultura de precisão uma vez que os programas computacionais o utilizam para poder monitorar o maquinário agrícola quando da aplicação de insumos com taxas variáveis.

O grau de dependência espacial foi classificado como fraco para Na⁺, K⁺ e RAS, e para os atributos pH, CE e PST foi moderado, sendo que apenas Ca²⁺ e Mg²⁺ apresentaram forte dependência. Esses resultados corroboram, em parte, os obtidos por Lima *et al.* (2017), cujos atributos que apresentaram dependência espacial foram pH, K⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺. No entanto, Ranjibar *et al.* (2016), estudando um modelo utilizando geoestatística para o manejo da salinidade e sodicidade, encontraram forte dependência espacial das variáveis pH, CE e RAS, assim como Bogunovic, Pereira e Brevik (2017), que obtiveram forte dependência para pH e CE em estudo sobre a distribuição espacial das propriedades químicas do solo em cultivo orgânico. Assim, pode-se inferir, com os resultados desses trabalhos, que não existe um grau de dependência predominante que possa explicar as variáveis do solo, cujas particularidades de cada estudo, a exemplo do tipo de solo, cultura e manejo da água e solo, contribuem para obtenção de resultados geoestatísticos distintos.

Os atributos que apresentaram forte dependência espacial são mais influenciados por propriedades intrínsecas do solo, tais como material de origem, enquanto os que apresentaram fraca dependência são mais influenciados por fatores externos, a exemplo do manejo de solo e água (CAMBERDELLA *et al.*, 1994).

A Figura 3 apresenta os mapas de krigagem com a distribuição espacial para os atributos avaliados.

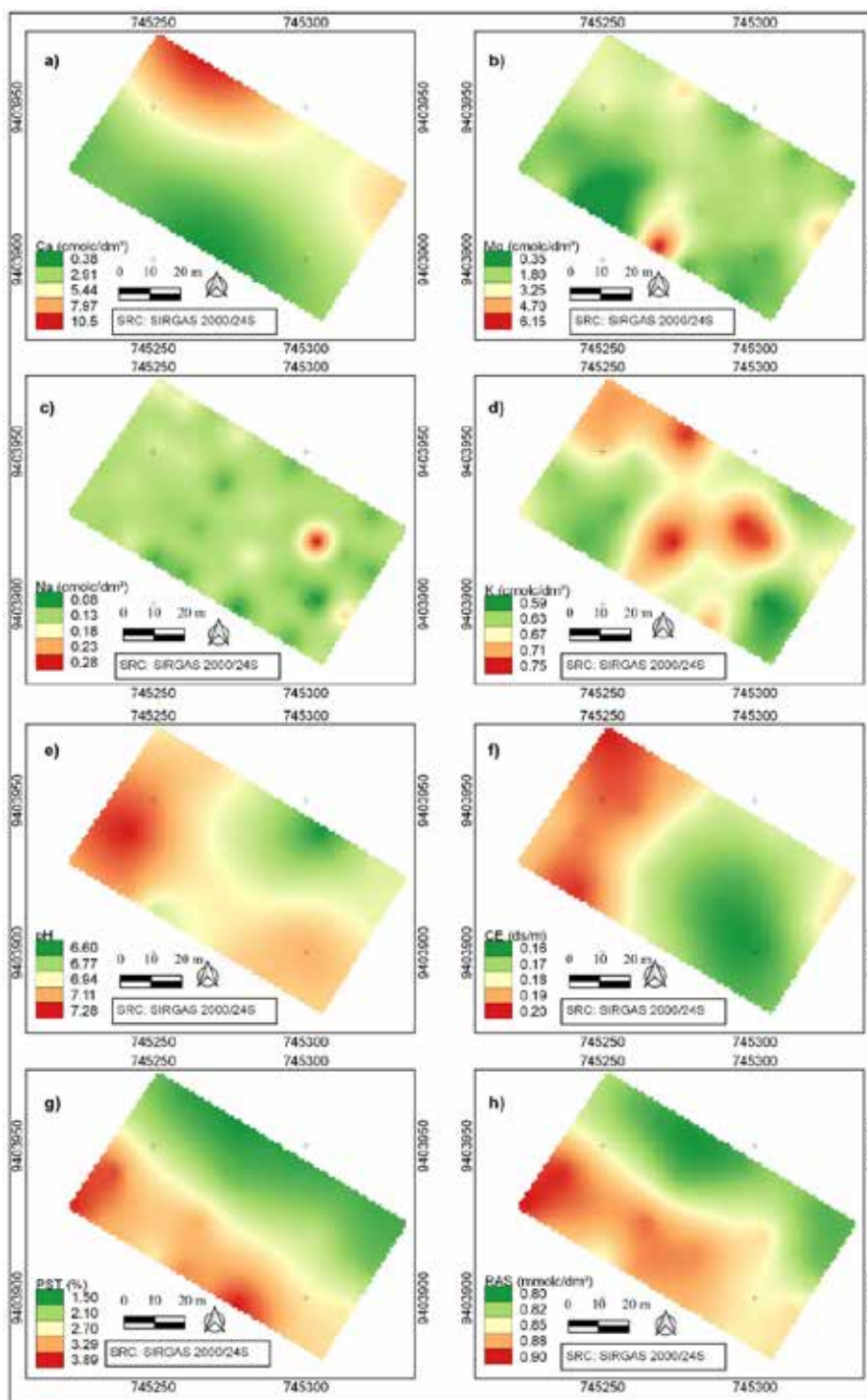


Figura 3. Mapas de krigagem para: a) Ca²⁺; b) Mg²⁺; c) Na⁺; d) K⁺; e) pH; f) CE; g) PST; h) RAS.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os mapas de distribuição mostram-se mais homogêneos para Mg²⁺ e Na⁺ (Figura 3b e 3c), sendo que para o Na⁺ a única mancha em vermelho, que indica maior concentração em relação às demais áreas, pode estar associada

a erros amostrais e ou devido ao manejo da irrigação com inadequado fornecimento das necessidades hídricas para lixiviar os sais. Assim, para esta última hipótese pode estar ocorrendo entupimento do sistema de irrigação, visto que nas demais áreas com o mesmo sistema a concentração de Na^+ é menor.

Já para os mapas de Ca^{2+} e K^+ (Figura 3a e 3d) observa-se uma maior heterogeneidade, porém com valores mínimos e máximos demonstrando pouca amplitude, tendo valores concentrados tanto no centro da área como na extremidade superior direita, o que pode ser devido à falta de homogeneidade na aplicação de fertilizantes.

Os mapas de pH e CE (Figura 3e e 3f) apresentaram diferenças visuais acentuadas, porém com teores dentro dos padrões para cambissolos, que comumente tende a valor de pH alcalino.

Para avaliar o risco de salinidade e sodicidade, os valores de CE, RAS e PST (Figura 3f, 3g e 3h) apontaram para uma área com baixo risco de sodicidade e baixo risco de salinidade de acordo com Richards (1954). Conforme a classificação de solos afetados por sais, proposta por Bohn *et al.* (1985), o solo da área estudada foi classificado como solo normal, pois em toda sua extensão apresentou $\text{CE} < 2\text{ds/m}$, $\text{PST} < 15\%$ e $\text{pH} < 8$. Esses resultados evidenciam que o manejo adotado na área é adequado para prevenir os riscos de salinidade e sodicidade, contribuindo para conservação do solo e da produtividade agrícola.

Conforme os mapas da Figura 3 observa-se que para as áreas não amostradas, mesmo alguns elementos com grau de dependência espacial fraca, as ferramentas de geoestatísticas forneceram informações relevantes para a adoção de práticas de agricultura de precisão, nas quais a aplicação de fertilizantes e insumos, conforme zonas de manejo delimitadas, proporcionará a racionalização de recursos e melhorará o potencial produtivo da área estudada, tornando-a sustentável.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As técnicas geoestatísticas foram eficientes para o mapeamento da salinidade e sodicidade do solo, permitindo a delimitação de zonas com diferentes níveis de concentração dos parâmetros mapeados.

A distribuição espacial dos elementos estudados não é homogênea, indicando que para cada parâmetro exige-se um manejo espacial diferente para evitar o risco de salinidade e sodicidade.

REFERÊNCIAS

- AKRAMKHANOV, A.; BRUS, D. J.; WALVOORT, D. J. J. Geostatistical monitoring of soil salinity in Uzbekistan by repeated EMI surveys. *Geoderma*, v. 213, p. 600-607, 2014.
- ARTUR, A. G.; OLIVEIRA, D. P.; COSTA, M. C.; ROMERO, R. E.; SILVA, M. V.; FERREIRA, T. O. Variabilidade espacial dos atributos químicos do solo, associada ao microrrelevo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 18, n. 2, p. 141-149, 2014.
- BERNARDI, A. D. C.; RABELLO, L. M.; INAMASU, R. Y.; GREGO, C. R.; ANDRADE, R. G. Variabilidade espacial de parâmetros físico-químicas do solo e biofísicos de superfície em cultivo do sorgo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 18, n. 6, p. 623-630, 2014.
- BOGUNOVIC, I.; PEREIRA, P.; BREVIK, E. C. Spatial distribution of soil chemical properties in an organic farm in Croatia. *Science of the total environment*, v. 584, p. 535-545, 2017.

BOHN, H. L.; McNELL, B. L.; O'CONNOR, G. A. **Soil chemistry**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1985.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOWAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society American Journal**, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.

CARMO FILHO, F.; ESPÍNOLA SOBRINHO, J.; MAIA NETO, J. M. **Dados climatológicos de Mossoró: um município semi-árido nordestino**. Mossoró: ESAM, 1991.

CAROLINO, J. A.; GUERRA, O. C.; ARAÚJO, W. P.; DE SOUSA, J. Y. B.; DE ALMEIDA, É. S. A. B.; BARRETO, H. T. S. Geoestatística aplicada ao estudo da salinidade do solo, Sumé. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v. 13, n. 2, p. 72-81, 2017.

DALCHIAVON, F. C.; CARVALHO, M. P.; NOGUEIRA, D. C.; ROMANO, D.; ABRANTES, F. L.; ASSIS, J. T. de; OLIVEIRA, M. S. de. Produtividade da soja e resistência mecânica à penetração do solo sob sistema plantio direto no cerrado brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 1, p. 8-19, 2011.

DINH, Q. T.; LIANG, D.; THI ANH THU, T.; Le, T. D. H.; DINH VUONG, N.; PHAM, V. T. Spatial prediction of saline and sodic soils in rice-shrimp farming land by using integrated artificial neural network/regression model and kriging. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 64, n. 3, p. 371-383, 2018.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília: Informação Tecnológica, 2009.

704 FERREIRA, L. L. N.; LEMOS FILHO, L. C. A.; TORRES, M. M.; OLIVEIRA JÚNIOR, R. F. D.; VALE, C. N. C. D.; FRANCO, M. S. D. B. P. Spatial variability of available water and micro-sprinkle irrigation in cambisol. **Revista Ceres**, v. 63, n. 6, p. 782-788, 2016.

KIM, H.; JEONG, H.; JEON, J.; BAE, S. Effects of irrigation with saline water on crop growth and yield in greenhouse cultivation. **Water**, v. 8, n. 4, p. 127, 2016.

LEMONS FILHO, L. C. A.; FERREIRA, L. L. N.; LYRA, D. L. Variabilidade espacial de atributos do solo indicadores de degradação ambiental em microbacia hidrográfica. **Agro@ambiente On-line**, v. 11, n. 1, p. 11-20, 2017.

LIMA, E. S.; MONTANARI, R.; LOVERA, L. H.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; GONZÁLEZ, A. P. Variabilidade espacial das propriedades dendrométricas do eucalipto e atributos químicos de um Neossolo Quartzarênico. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 4, n. 1, p. 1-11, 2017.

MATHERON, G. Principles of geostatistics, economic geology. **Economic Geology**, v. 58, n. 8, p. 1246-1266, 1963.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B.; WHELAN, B. M. 2002. **Vesper version 1.6**. Sidney: Australian Centre for Precision Agriculture, McMillan Building A05, The University of Sydney, NSW, 2006.

MINHAS, P. S.; RAMOS, T. B.; BEN-GAL, A.; PEREIRA, L. S. Coping with salinity in irrigated agriculture: Crop evapotranspiration and water management issues. **Agricultural Water Management**, v. 227, p. 105832, 2020.

MÜLLER, D. H.; CAMILI, E. C.; SCARAMUZZA, W. L. M. P. Spatial variability in soybean seeds quality and in chemical attributes of the soil of a production field in the Brazilian Cerrado. **Journal of Seed Science**, v. 40, n. 1, p. 25-35, 2018.

MUÑOZ-NÁJERA, M. A.; TAPIA-SILVA, F. O.; BARRERA-ESCORCIA, G.; RAMÍREZ-ROMERO, P. Statistical and geostatistical spatial and temporal variability of physico-chemical parameters, nutrients, and contaminants in the Tenango

Dam, Puebla, Mexico. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 209, p. 106435, 2020.

NIÑEROLA, V. B.; NAVARRO-PEDREÑO, J.; LUCAS, I. G.; PASTOR, I. M.; VIDAL, M. M. J. Geostatistical assessment of soil salinity and cropping systems used as soil phytoremediation strategy. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 174, p. 53-58, 2017.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS**. Versão 2.18.20, 2018.

RANJBAR, F.; JALALI, M. The combination of geostatistics and geochemical simulation for the site-specific management of soil salinity and sodicity. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 121, p. 301-312, 2016.

RESENDE, R. S.; AMORIM, J. R.; CRUZ, M. A.; MENESES, T. N. Distribuição espacial e lixiviação natural de sais em solos do Perímetro Irrigado Califórnia, em Sergipe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, v. 18, 2014.

RIBEIRO JÚNIOR, P. J.; DIGGLE, P. J. **GeoR**: a package for geostatistical analysis. **RNEWS**, v. 1, n. 2, p. 15-18, 2001.

RICHARDS, Lorenzo Adolph. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. LWW, 1954.

RODRIGUES, M. S.; ALVES, D. C.; CUNHA, J. C.; LIMA, A. M. N.; CAVALCANTE, I. H. L.; DA SILVA, K. A.; DE MELO JUNIOR, J. C. F. Spatial analysis of soil salinity in a mango irrigated area in semi-arid climate region. **Australian Journal of Crop Science**, v. 12, n. 8, p. 1288, 2018.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, v. 52, p. 591-611, 1965.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: Hillel, D. (ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academic, 1980. cap. 2, p. 319-344.

XU, L.; DU, H.; ZHANG, X. Spatial Distribution Characteristics of Soil Salinity and Moisture and Its Influence on Agricultural Irrigation in the Ili River Valley, China. **Sustainability**, v. 11, n. 24, p. 7142, 2019.

YUSUF, B. L.; MUSTAPHA, A.; YUSUF, M. A.; AHMED, M. Soil salinity assessment using geostatistical models in some parts of Kano River Irrigation Project Phase I (KRPI). **Modeling Earth Systems and Environment**, p. 1-10, 2020.

ZONTA, J. H.; BRANDÃO, Z. N.; MEDEIROS, J. C.; SANA, R. S.; SOFFIATI, V. Variabilidade espacial da fertilidade do solo em área cultivada com algodoeiro no Cerrado do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 6, p. 595-602, 2014.