

**Espacialidade dos atributos químicos de águas subterrâneas do município de Granito,
PE**

Spatiality of groundwater chemical attributes in the municipality of Granito, PE

**Espacialidad de los atributos químicos del agua subterránea en el municipio de Granito,
PE**

Recebido: 01/12/2020 | Revisado: 08/12/2020 | Aceito: 12/12/2020 | Publicado: 14/12/2020

Erismar Vieira Moreira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7594-7595>

Faculdade de Ciências Agrárias de Araripina, Brasil

E-mail: erismarmoreira68@gmail.com

Gilberto Saraiva Tavares Filho

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3360-4022>

Universidade Federal do Vale do São Francisco, Brasil

E-mail: gilfilho753@hotmail.com

Fabio Freire de Oliveira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7798-6339>

Instituto Federal do Sertão Pernambucano, Brasil

E-mail: fabio.freire@ifsertao-pe.edu.br

Francisco Avelar Pereira Júnior

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9906-1369>

Faculdade de Ciências Agrárias de Araripina, Brasil

E-mail: franciscoajunior@prof.aeda.edu.br

Cícero Antônio de Sousa Araújo

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1496-7960>

Instituto Federal do Sertão Pernambucano, Brasil

E-mail: cicero.araujo@ifsertao-pe.edu.br

Sammy Sidney Rocha Matias

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5729-3284>

Universidade Estadual do Piauí, Brasil

E-mail: ymmsa2001@yahoo.com.br

Resumo

A exploração racional e sustentável das águas subterrâneas se torna atualmente cada vez mais importante, para fins de irrigação. Nas regiões semiáridas a irrigação manejada de forma não adequada pode causar salinização e sodificação do solo e aumento da escassez das águas subterrâneas. O conhecimento do comportamento espacial dos parâmetros de qualidade química das águas subterrâneas é indispensável para um manejo preciso da irrigação. Neste trabalho, buscou-se avaliar a variabilidade espacial dos atributos químicos das águas subterrâneas utilizadas na irrigação no semiárido pernambucano. Águas do município de Granito-PE, utilizadas para fins agrícola, foram avaliadas quanto aos atributos químicos: pH, Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , CE e RAS. Os resultados foram analisados por meio da estatística descritiva, correlação de Person e geoestatística. A água subterrânea usada para a irrigação do município de Granito em sua maioria 95% salina e 20% apresenta caráter sódico. Com os mapas de variabilidade espacial foi possível identificar as zonas com maior e menor potencial de salinização pelo uso de água subterrânea.

Palavras-chave: Krigagem; Recursos Hídricos; Qualidade de Águas; Semiárido.

Abstract

The rational and sustainable exploitation of groundwater is now becoming increasingly important for irrigation purposes. In semi-arid regions, irrigation handled improperly can cause salinization and sodification of soils and increased groundwater scarcity. The knowledge of the spatial behavior of the groundwater chemical quality parameters is essential for an accurate irrigation management. In this work, we sought to evaluate the spatial variability of the chemical attributes of groundwater used in irrigation in the Pernambuco semiarid region. Waters of the municipality of Granito-PE, used for agricultural purposes, were evaluated for chemical attributes: pH, Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , CE and RAS was calculated. The results were analyzed using descriptive statistics, Person correlation and geostatistics. The groundwater used for irrigation in the municipality of Granito for the mostly part it 95% saline and 20% have sodium character. With the spatial variability maps, it was possible to identify the zones with greater and lesser salinization potential by using groundwater.

Keywords: Krigagem; Water Resources; Water Quality; Semiarid.

Resumen

La explotación racional y sostenible de las aguas subterráneas se está volviendo cada vez más importante para fines de riego. En las regiones semiáridas, el riego manejado incorrectamente

puede causar salinización y sodificación del suelo y una mayor escasez de agua subterránea. El conocimiento del comportamiento espacial de los parámetros de calidad química de las aguas subterráneas es indispensable para una correcta gestión del riego. En este trabajo, buscamos evaluar la variabilidad espacial de los atributos químicos del agua subterránea utilizada en el riego en la región semiárida de Pernambuco. Las aguas del municipio de Granito-PE, utilizadas para fines agrícolas, fueron evaluadas en cuanto a atributos químicos: pH, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺, CE y RAS. Los resultados se analizaron mediante estadística descriptiva, correlación de personas y geoestadística. El agua subterránea que se utiliza para el riego en el municipio de Granito es en su mayoría 95% salina y 20% tiene carácter sódico. Con los mapas de variabilidad espacial se logró identificar las zonas con mayor y menor potencial de salinización por uso de agua subterránea.

Palabras clave: Kriging; Recursos Hídricos; Calidad del Agua; Semiárido.

1. Introdução

O semiárido nordestino é caracterizado por apresentar curtos períodos de chuva com longos períodos de seca, favorecendo uma distribuição desuniforme das águas disponíveis em quantidade e qualidade (Souza & Ribeiro, 2016).

A baixa pluviosidade no semiárido reduz a disponibilidade de águas superficiais em reservatórios, favorecendo a utilização de águas subterráneas, provenientes de poços tubulares e amazonas, desse modo sendo uma fonte hídrica importante para essa região (Torres et al., 2016). Segundo Andrade et al. (2012), apesar de ser um recurso renovável, a influência do homem na modificação do ambiente tem interferido diretamente na qualidade das águas subterráneas, em razão da destruição da cobertura vegetal favorecer uma menor infiltração e retenção da água das chuvas.

Além disso, a água captada nesta região por poços tubulares não garante qualidade suficiente e quantidade adequada às necessidades humanas, industrial, animal e agrícola sem comprometer a qualidade ambiental. Este fato está embasado nos parâmetros da qualidade da água relacionado com a salinização e sodificação dos solos (Ayers & Westcot, 1999; Pessoa et al., 2016; Lacerda et al., 2017).

Concentrações de sais nas águas subterráneas e superficiais (armazenadas) acima de 1 g L⁻¹ é comum na região semiárida e, geral, compromete a utilização para fins agrícola. Contudo, nas áreas onde esse é o único recurso disponível, requer-se, o monitoramento

sistemático devido os riscos negativos à planta, ao solo e ao ambiente (Pessoa et al., 2016; Torres et al., 2016).

O conhecimento da qualidade dos parâmetros químicos das águas subterrâneas, relacionado à concentração salina, em relação a sua distribuição espacial, conforme Rocha et al. (2017), é de suma importância para o planejamento da exploração e manejo das águas subterrâneas, com o intuito de assegurar a sustentabilidade e precaver a degradação dos recursos hídricos.

Isso exige uma adequada caracterização das propriedades da água, tornando-se significativo considerar sua variabilidade espacial, por meio da geoestatística, que permite a análise de propriedades que variam de um local para outro com algum grau de organização ou continuidade, expresso mediante a dependência espacial, de forma a obter conhecimento sobre a variabilidade das propriedades do solo, influenciando diretamente nos fatores de manejo e conservação dos solos (Lundgren et al., 2017; Matias et al., 2019).

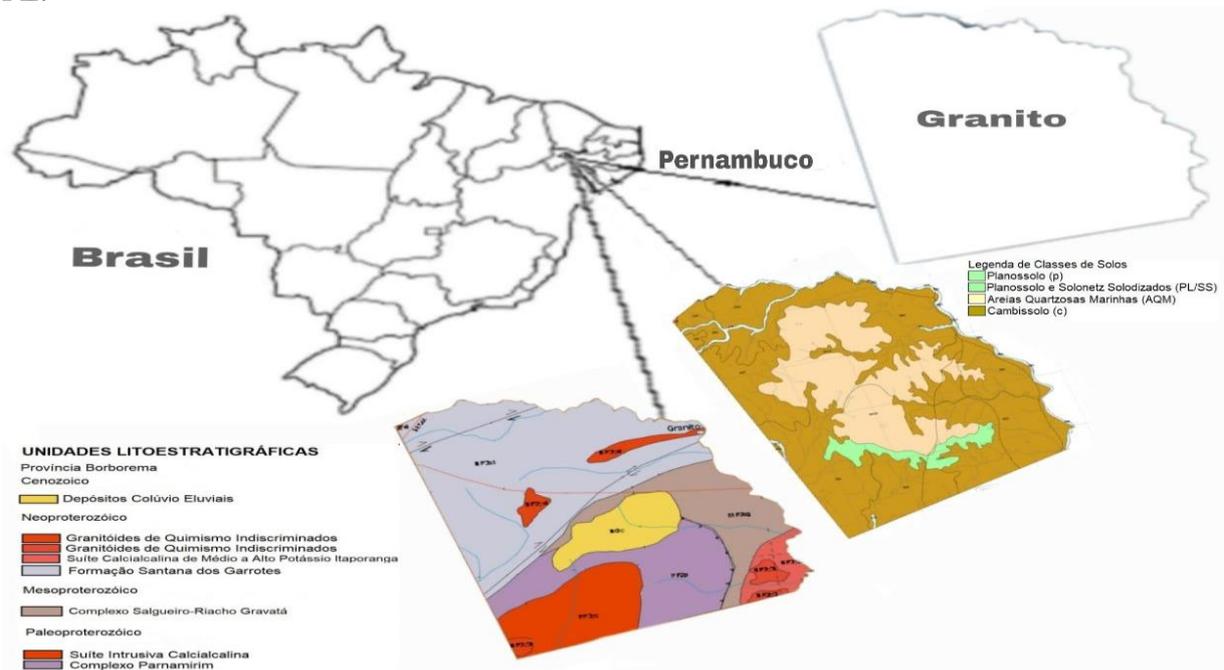
A geoestatística possibilita inferir sobre a qualidade da água, através da geração de mapas para diagnósticos das variações que ocorrem, considerando os valores que estão relacionados à sua disposição espacial e quais atributos estão melhor se correlacionando, possibilitando a identificação do grau de dependência espacial ou não entre os pontos amostrados (Rocha et al., 2017).

Estudos da variabilidade espacial dos atributos visando o uso na agricultura veem sendo desenvolvidos na irrigação convencional e fertirrigação, indicando a necessidade de monitorar os recursos hídricos das áreas agricultáveis (Andrade et al., 2012). Diante do exposto, objetivou-se avaliar a variabilidade espacial dos atributos químicos das águas subterrâneas utilizadas na irrigação no município de Granito, semiárido pernambucano.

2. Metodologia

O trabalho foi realizado no município de Granito no Estado de Pernambuco, situado pelos pontos das coordenadas geográficas latitude 7°42'58.63" S e longitude 39°36'54.49" O e altitude de 447 m. O clima da região é caracterizado segundo a classificação de Köppen, como do tipo Bshw', tipo estepe, semiárido quente, com a estação chuvosa atrasada para o outono, com temperatura média de 25 °C, e o valor da pluviosidade média anual é de 600 mm (Sá et al., 2011). A Figura 1, descreve a localização do município, tipos de solo e litologia.

Figura 1. Mapas pedológico e geológico da área amostral, município Granito – PE.



Fonte: Adaptação: Embrapa Solos UEP Recife (2006).

Amostras de águas foram coletadas manualmente com garrafas pets, em poços tubulares, perfurados com máquinas perfuratrizes em diferentes tipos de solos, e amazonas, escavados manualmente, as margens e no meio dos cursos de água intermitentes, espaçado a cada 900 m, totalizando 153 amostras. O georreferenciamento dos pontos na área amostral foi feito com GPS (Garmin GPSMap 76CSx) com o sistema de coordenadas UTM (Universal Transversa de Mercator). O estudo foi realizado nos meses de agosto e setembro de 2018, em propriedades que estão utilizando águas subterrâneas, para fins de irrigação em culturas forrageiras como capim elefante (*Pennisetum purpureum*) capim corrente (*Urochloa mosambicensis* (Hack.) Dandy) e capim-braquiária (*Brachiaria decumbens*).

As amostras foram acondicionadas em garrafas plásticas, previamente preparada mediante tríplice lavagem com utilização de água do próprio poço a ser coletada, evitando resíduos de outros materiais. Os recipientes após limpos, foram preenchidos completo (500 mL) para não deixar espaço vazio entre a água e a tampa, após isso foram encaminhadas para o Laboratório de Análise de Solo e Planta do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano (IF Sertão-PE), localizado no município de Petrolina-PE. Foram avaliados os seguintes atributos da água: condutividade elétrica (CE), pH, K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ e relação de adsorção de sódio (RAS), conforme os procedimentos

recomendados por Teixeira et al. (2017). A partir dos resultados obtidos foi calculado a RAS, por meio da Eq.1: que segue, proposta por Richards (1954).

$$RAS = \frac{Na}{\sqrt{\frac{(Ca+Mg)}{2}}} \quad (1)$$

A Tabela 1, descreve os valores de condutividade elétrica (C) e de relação de adsorção de sódio (S) padrões para classificar águas de irrigação.

Tabela 1. Valores de condutividade elétrica (C) e de relação de adsorção de sódio (S) padrões para classificação de águas para irrigação.

Salinidade ¹		Sodicidade ²	
C1 < 0,75	baixo risco de salinidade	S1 < 13	Baixo
C2 0,75 a 1,50	médio risco de salinidade	S2 13,1 a 20	Médio
C3 1,50 a 3,00	alto risco de salinidade	S3 20,1 a 30	Alto
C4 > 3,00	muito alto o risco de salinidade	S4 > 30	Muito Alto

¹Classificado de acordo com Frenkel (1984). ²Classificado de acordo com Ayers e Westcot (1999).

A avaliação estatística foi feita com base no estudo exploratório dos dados usando o software MINITAB®, calculando as medidas de posição (média, mediana, mínimo e máximo), as medidas de variabilidade (coeficiente de variação – CV%) e as medidas de tendência central (assimetria e curtose), para verificação da normalidade dos atributos químicos avaliados. Para a avaliação do CV, foi utilizado a classificação de Warrick e Nielsen (1980), com variabilidade baixa para valores menores de 12%, média entre 12 e 60%, e alta para valores maiores de 60%. Foi realizado a correlação linear de Pearson nos atributos da água analisadas. Sendo classificada de acordo com Santos (2007), da seguinte forma, valores de $|r| > 0,8$ (Forte); $0,5 < |r| < 0,8$ (Moderados); $0,1 < |r| < 0,5$ (Fraca) e de $0 < |r| < 0,1$ (muito fraca).

Os semivariogramas foram confeccionados pelo programa de GS⁺® e ajustados aos dados os modelos: esférico, exponencial, gaussiano. A partir destes modelos, ocorreu a predição dos atributos em zonas não amostradas mediante krigagem, representadas em mapas de contorno, utilizando o programa SURFER®. A escolha dos modelos teóricos foi realizada observando-se a soma do quadrado dos resíduos (SQR), o coeficiente de determinação (R²) e,

posteriormente, o coeficiente de correlação obtido pela técnica da validação cruzada. O grau da dependência espacial (GDE) foi classificada com base entre o efeito pepita e o patamar $(C_0/C_0+C_1)*100$, que considera o grau de dependência espacial forte, quando a relação $C_0/(C_0+C_1)$ for menor que 25%, moderado quando a relação estiver entre 25 e 75% e fraco quando a relação for maior que 75% (Cambardella et al., 1994).

3. Resultados e Discussão

Os resultados gerados pela análise estatística descritiva estão na Tabela 2, onde, observa-se que as variáveis apresentaram valores de mediana, em média, 46,2% menor que os valores da média. Oliveira et al. (2015), afirma que a normalidade esperada na análise descritiva, não é um parâmetro de exigência da geoestatística, é observado ou exigido que apenas os dados possuam uma variação entre eles.

Tabela 2. Análise descritiva dos atributos químicos da água subterrânea no município de Granito, área semiárida do Estado de Pernambuco.

Atributos	Méd	Med	DP	Mín	Máx	Coeficientes				
						Ass	Cur	CV	NP	PR
pH	7,22	7,17	0,35	6,44	8,5	0,61	0,6	4,3	153	9
CE (dS m ⁻¹)	2,71	1,84	2,45	0,29	16,0	2,33	7,3	90,4	153	5
Na ⁺ (mg L ⁻¹)	211,8	185,5	148,0	12,0	769,4	1,59	3,1	69,9	153	16
K ⁺ (mg L ⁻¹)	11,23	7,00	12,56	1,00	83,6	3,40	14	111,9	153	13
Ca ²⁺ (mg L ⁻¹)	120,5	9,3	196,3	1,00	831,6	2,15	4,4	162,9	153	14
Mg ²⁺ (mg L ⁻¹)	43,20	1,6	66,4	0,37	290	2,02	3,8	153,8	153	16
RAS (mmol L ⁻¹)	8,75	5,9	7,2	0,83	38	1,48	2,1	82,7	153	13

CV: Coeficiente de Variação [CV% = (Desvio-padrão/Média) x 100], Méd: média, Med: mediana, Max: valores máximos, Mín: valores mínimos, DP: desvio Padrão, Ass: Assimetria; Cur: Curtose, Condutividade Elétrica (CE), Relação de Adsorção de Sódio (RAS), NP: Número de Pontos, PR: Pontos Retirados. Fonte: Autores.

Constata-se estacionalidade, no valor de pH, logo, os valores não oscilaram e se mantiveram muito próximos, evidenciando baixa variabilidade, ao contrário do verificado entre os valores de CE, Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ e RAS. Os valores do desvio padrão foram altos para os teores de K⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺ comparado com as respectivas médias, justificados pela alta

dispersão dos valores em relação à média. Essa dispersão é resposta da litologia predominante no município de Granito, PE, de modo que a heterogeneidade das rochas exerce efeito direto nos teores dos elementos contidos nas águas subterrâneas (Figura 1).

Os valores de coeficientes de assimetria e curtose não ficaram próximo de zero, indicando que não existe uma distribuição normal entre as variáveis analisadas. A assimetria ficou distribuída a sua direita e positiva. A curtose permitiu a identificação do grau de normalidade dos dados, que segundo Negreiros Neto et al. (2014), os valores devem variar entre nulos ou +2 e -2, preferencialmente. Os valores obtidos na Tabela 2 são distantes desta distribuição, com exceção do valor de pH, revelando que os dados não possuem distribuição normal.

Os valores do coeficiente de variação (CV%) indicam distribuição homogênea com valores menor que 12%, heterogênea com CV entre 12% e 60% e muito heterogênea com valor de CV maior que 60% (Warrick & Nielsen, 1980). Seguindo essa linha de classificação, verificou-se que os valores dos atributos da água (Tabela 2), apresentam uma alta distribuição heterogênea, conseqüentemente uma alta variabilidade dos atributos químicos exceto para pH, que apresentou uma distribuição homogênea. De acordo com Holanda et al. (2016), a variabilidade dos atributos químicos das águas, pode ser associada variação de classes de solo. Segundo Matias et al. (2019), a variação do CV, também pode estar associado a questões antrópicas e de material de origem.

Ao avaliar a correlação linear de Pearson para os atributos químicos da água (Tabela 3) verifica-se interação positiva e significativa para a maioria das variáveis ao nível de $p < 0,05$ de probabilidade.

Tabela 3. Correlação linear de Pearson entre os atributos químicos da água subterrânea no município de Granito, área semiárida do Estado de Pernambuco.

	pH	CE	Na⁺	K⁺	Ca²⁺	Mg²⁺
CE	-0,160					
Na²⁺	-0,113	0,729**				
K⁺	-0,030	0,546**	0,505**			
Ca²⁺	-0,281**	0,635**	0,509**	0,396**		
Mg²⁺	-0,153	0,713**	0,717**	0,663**	0,632**	
RAS	0,157	-0,253**	-0,006	-0,247**	-0,419**	-0,403**

Condutividade Elétrica (CE), Relação de Adsorção de Sódio (RAS). * e ** Significativo a ($p < 0,01$ e $p < 0,05$), respectivamente, pelo teste F. Fonte: Autores.

Observa-se que existe uma correlação da variável pH e Ca^{2+} , de forma significativa e negativa. Com relação a CE, houve uma relação positiva com Na^+ (0,729); K^+ (0,546), Ca^{2+} (0,635), Mg^{2+} (0,713) e negativa com RAS (-0,253), ao nível de $p < 0,05$. Para o Na^+ , foi verificado uma significância com K^+ (0,505), Ca^{2+} (0,509) e Mg^{2+} (0,717) de forma positiva. Quanto ao K^+ , a sua relação foi evidenciada para Ca^{2+} (0,396), Mg^{2+} (0,663), e RAS (-0,247), respectivamente, positiva e negativa com a última. Para o Ca^{2+} , ocorreu uma relação com Mg^{2+} (0,632) e RAS (-0,419), positiva e negativa ao nível de $p < 0,05$. Quanto ao Mg^{2+} , verificou-se uma relação negativa com a RAS (-0,403). Quando a correlação é negativa os resultados exercem uma posição inversamente proporcional, isso significa que à medida que uma variável aumenta a outra tende a decrescer. Ao inverso ocorre com positiva, quando um aumenta a outra variável tende a aumentar também (Torres et al., 2016).

A matriz de correlação mostra que a CE possui correlação moderada positiva com Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e negativa com a RAS, pois quando as águas possuem altas concentrações de Na^+ em relação ao Ca^{2+} e Mg^{2+} , apresenta risco de sodificação, assim promovendo a adsorção de Na^+ no solo e deslocamento do Ca^{2+} e Mg^{2+} para a solução (Holanda et al., 2016; Lacerda et al., 2017; Pessoa et al., 2016).

Na Tabela 4 são descritos os resultados da geoestatística para análises dos atributos químicos da água. Nota-se que todas as variáveis analisadas se ajustaram a um modelo, em que as variáveis pH e CE ajustaram-se ao modelo exponencial e as demais variáveis ao modelo esférico (K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ e RAS). Andrade et al. (2012), estudando a variabilidade espaço-temporal da condutividade elétrica da água subterrânea, encontrou, resultados semelhantes aos obtidos no presente estudo. O modelo esférico também é o mais obtido para esses atributos na área de solo, indicando uma tendência na modelagem (Carneiro et al., 2017; Freitas et al., 2017).

Tabela 4. Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas ajustados para os atributos químicos da água subterrânea no município de Granito, área semiárida do Estado de Pernambuco.

Atributos	Modelo	C ₀	C ₀ +C ₁	GDE	Alcance(Km)	R ²	CRVC	
							b	A
pH	Exponencial	0,0508	0,1456	34,8901	3.6	0,95	0,91	0,64
CE	Exponencial	1,13	7,041	16,0489	3.48	0,62	0,80	0,58
Na⁺	Esférico	730	22270	3,27795	1.37	0,63	0,92	24,01
K⁺	Esférico	0,1	197	0,05076	6.01	0,79	0,95	1,61
Ca²⁺	Esférico	22010	47270	46,5623	5.61	0,67	0,94	9,52
Mg²⁺	Esférico	1400	5479	25,5521	4.87	0,74	0,88	8,61
RAS	Esférico	15,4	54,45	28,2828	7.75	0,92	0,86	1,5

GDE: Grau de dependência espacial [$GDE\% = (C_0/C_0+C_1) \times 100$]; R²: Coeficiente de determinação do modelo; CRVC: Coeficiente de regressão da validação cruzada; b: Coeficiente angular; a: Interceptor; Condutividade Elétrica (CE), Relação de Adsorção de Sódio (RAS). Fonte: Autores.

Verifica-se que houve efeito pepita (C₀), para as variáveis analisadas. A ocorrência do C₀ está relacionado com a densidade amostral utilizada, indicando ou não a variância entre os dados, ou seja, quando existe efeito pepita, não foi possível identificar a variabilidade daquele atributo analisado (Carvalho et al., 2018). Nesse trabalho, os valores maiores foram obtidos para Ca²⁺, Mg²⁺ e Na⁺, sendo o menor para o pH indicando a baixa variabilidade (Tabela 4).

Em relação ao C₀ + C₁, observa-se que os atributos apresentaram variância com amplitude de 0,1456 para o pH e 47270 para o Ca²⁺, demonstrando que entre esses dados de amplitude a estacionalidade é real, corroborando com a definição da variabilidade espacial dos pontos amostrados. A existência do patamar proporciona identificar a estacionalidade dos resultados dos pontos amostrados, com relação aos pares de dados, resultando em valores constantes, ou seja, é o valor onde a correlação entre amostras é nula (Carneiro et al., 2017).

O grau de dependência espacial (GDE) mostrou moderada dependência para os atributos pH (39,89%), Ca²⁺ (46,56%), Mg²⁺ (25,55%) e RAS (28,28%) e para os parâmetros CE (16,04%), Na⁺ (3,27%) e K⁺ (0,05%) exibiu forte grau de dependência espacial, segundo a classificação de Cambardella et al. (1994). Esses resultados evidenciam que a distribuição dos atributos químicos no espaço não é aleatória, pois apresentaram valores moderados ou fortes para o grau de dependência espacial, de modo que os semivariogramas explicam a maior parte da variância dos dados experimentais. A forte dependência espacial obtida nos atributos é

intensamente influenciada pela mineralogia (Carvalho et al., 2018), indicando que o modelo e a densidade amostral, refletem a confiabilidade dos dados em função da realidade da área.

Em pesquisa realizada por Torres et al. (2016), três modelos testados apresentaram forte dependência espacial, analisando a variação espacial do armazenamento de água no solo. Vicente et al. (2018) também observaram a alta dependência na dinâmica espacial dos parâmetros químicos da água em um sistema aquífero. Resultados semelhantes ao estudo foram verificados por Negreiros Neto et al. (2014), ao analisar a dependência espacial dos atributos físico-químicos de um Latossolo.

O alcance, está relacionado com o espaçamento entre uma amostra e outra, indicando o grau de correlação espacial existente entre os pontos amostrais. Esse conhecimento indica que o alcance acima do valor obtido não possui relação, ou seja, possui distribuição aleatória e, por essa razão, são independentes entre si, devendo ser aplicada a estatística clássica (Matias et al., 2019; Vicente et al., 2018), ou aumentar a densidade amostral.

Pelos resultados, o alcance variou de 1.37 a 7.75 Km, para as variáveis Na^+ e RAS, respectivamente. Indicando que, dependendo da variável analisada, existe a possibilidade de as distâncias poderem ser diferente. Além disso, o menor valor obtido na variável Na^+ pode estar associado ao valor de CRVC (a), que ficou distante do parâmetro considerado normal (0).

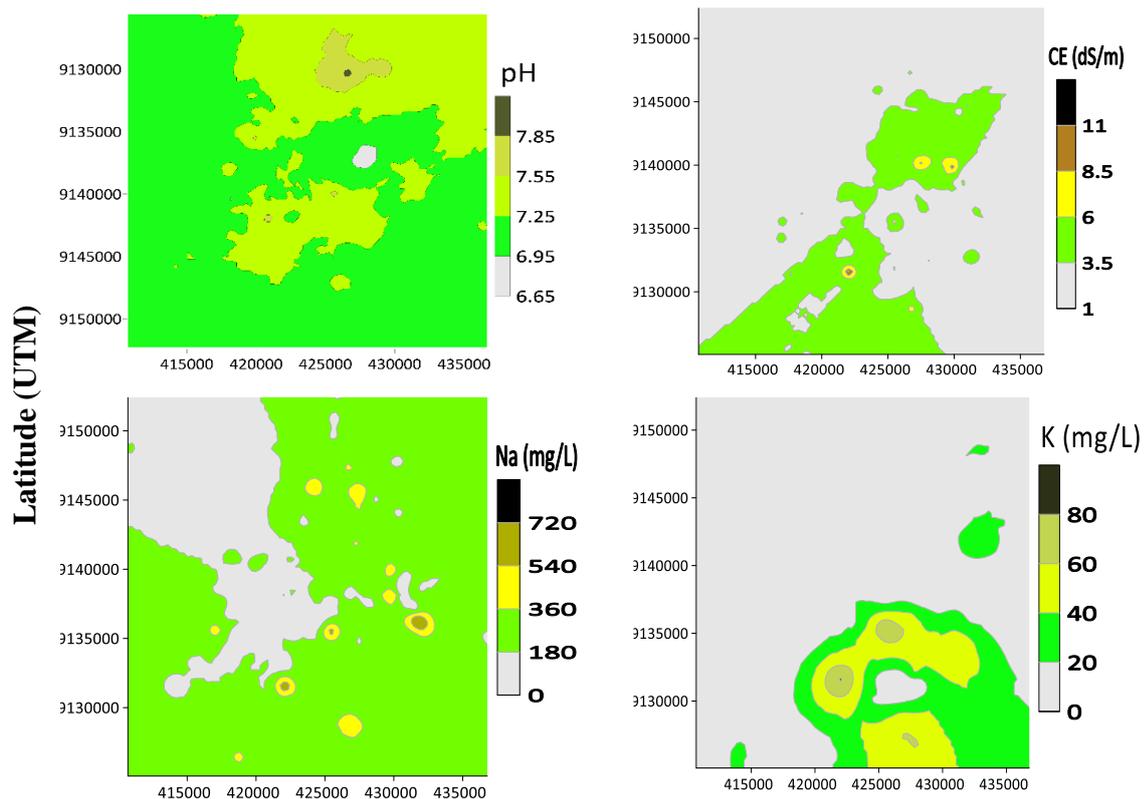
Ainda de acordo com os resultados da Tabela 4, o alcance, conforme a literatura, é o principal instrumento fornecido pela técnica da geoestatística, e seu conhecimento é importante na implantação de uma agricultura sustentável do ponto de vista econômico e ambiental, pois, permite o monitoramento do comportamento das variáveis estudadas (Carvalho et al., 2018; Vicente et al., 2018). Nessa direção, o valor do alcance pode influenciar a qualidade das estimativas, uma vez que ele determina o número de valores usados na interpolação, delimitando a extensão da correlação espacial entre as amostras (Negreiros Neto et al., 2014; Vicente et al., 2018).

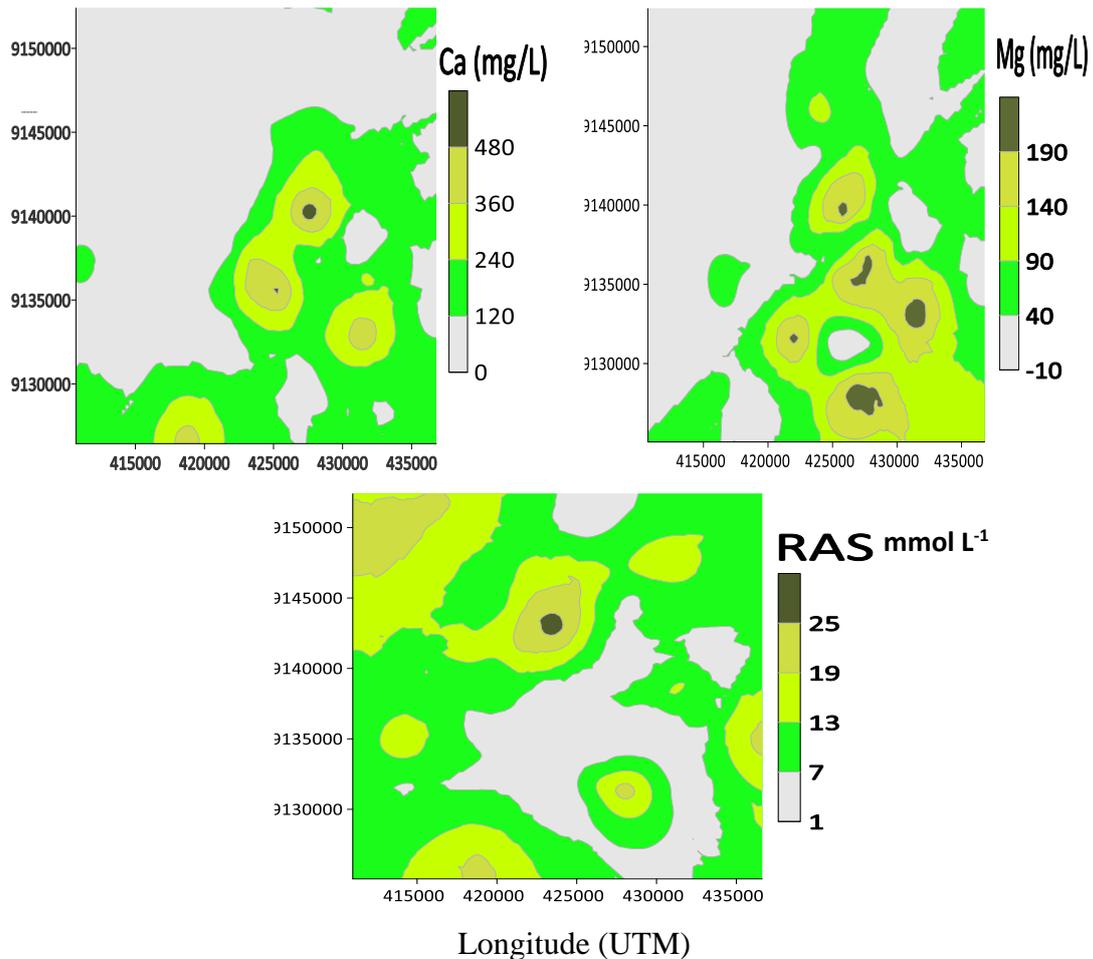
Os valores dos coeficientes de determinação espacial (R^2), variaram entre 0,62 e 0,95, respectivamente para os atributos pH e CE (Tabela 4). A análise do R^2 , de forma geral, indica a relação do valor real e o estimado pela equação, quando mais próximo de 1, melhor é essa relação. Porém, outro parametro que deve ser observado para validar o R^2 , é o coeficiente de regressão da validação cruzada (CRVC), que é analisada da seguinte forma, valores próximos de um (b) e zero (a), indicam que o modelo realmente está expressando a situação real da área, em virtude do valor real ser igual ou próximo do valor estimado.

De acordo com a tabela 4, o Na^+ , foi o que obteve menor correlação, de acordo com a CRVC, esse resultado refletiu no R^2 . De acordo com Vicente et al. (2018), a relação positiva entre o R^2 e a CRVC, indica que o modelo ajustado a densidade amostral utilizada, infere a dinâmica do comportamento dos atributos das variáveis analisadas. Dessa forma, os maiores valores de CRVC (b) e os menores (a), apresentam um menor erro, tornando-se confiáveis para o uso da krigagem (Lundgren et al., 2017).

Com base nos ajustes dos semivariogramas, foi possível confeccionar e construir os mapas de krigagem (Figura 2) dos atributos químicos da água, pH, CE, Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e RAS, possibilitando a definição de zonas específicas. Dessa forma a construção dos mapas, proporciona identificar a maior e menor variabilidade em relação aos atributos (Lundgren et al., 2017; Vicente et al., 2018).

Figura 2. Mapas da distribuição espacial dos atributos químicos da água subterrânea no município de Granito, área semiárida do Estado de Pernambuco.





Fonte: Autores.

As isolinhas ou contornos produzidos por interpolação utilizando-se a técnica de krigagem ordinária, indica uma maior ou menor variabilidade, sendo classificada ou identificada como, linhas fechadas e próximas, caracterizam a área com maior variabilidade, enquanto que a presença de linhas espaçadas demonstra a condição de menor variabilidade (Matias et al., 2019).

As correlações indicadas na Tabela 3 estão em coerência com os mapas dos atributos químicos da água (Figura 2). Nos mapas, verifica-se que o pH foi classificado como neutro de forma geral. Indicando baixa relação com os demais atributos. Marques e Lima (2017), relatam que as águas tendem a apresentar valores de pH próximos a neutralidade. Observa-se elevadas concentrações de Na⁺, K⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺, o qual refletiu diretamente em altas concentrações da CE. Desse modo a maioria dos poços apresentou médio, alto e muito alto risco de salinização, conforme a classificação de Frenkel (1984), sendo distribuídos nas classes C2, C3 e C4. Com base em Ayers e Westcot (1999), C2 varia de 0,7 a 1,5 dS m⁻¹, C3 de 1,5 a 3 dS m⁻¹ e C4 >3 dS m⁻¹.

Quando se estimou a RAS, observou-se que a maioria das águas subterrâneas não apresenta risco quanto a sodicidade, de acordo com a classificação proposta por Ayers e Westcot (1999). Logo, mesmo com altos índices de Na^+ , o risco de sodificação pode ser reduzido pelos altos níveis de Ca^{2+} e Mg^{2+} .

A identificação da variabilidade dos atributos químicos da água permite separar os locais com maior qualidade que permitem ser recomendada para utilização na irrigação das culturas, melhorando a eficiência do sistema e conseqüentemente do manejo, evitando assim, a salinidade e sodicidade do solo.

4. Considerações Finais

As águas subterrâneas do município de Granito, em sua maioria (95%), apresentam indícios de salinização e 20% de sodicidade possui risco severo.

Os mapas de variabilidade espacial, dos atributos químicos das águas, identificaram as zonas com maior e menor risco de salinizarem o solo mediante a irrigação.

Referências

Andrade, T. S., Montenegro, S. M., Montenegro, A. A., e Rodrigues, D. F. (2012). Variabilidade espaço-temporal da condutividade elétrica da água subterrânea na região semiárida de Pernambuco. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 16(5), 496-504.

Ayers, R. S. e Westcot, D. W. (1999). *Estudos de Irrigação e Drenagem*. 2. ed. Campina Grande: UFPB, FAO.

Cambardella, C. A., Moorman, T. B., Novak, J. M., Parkin, T. B., Karlen, D. L., Turco, R. F., e Konopka, A. E. (1994). Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil science society of America journal*, 58(5), 1501-1511.

Carneiro, J. S. S., de Faria, Á. J. G., Fidelis, R. R., da Silva Neto, S. P., Santos, A. C., e Silva, R. R. (2016). Diagnóstico da variabilidade espacial e manejo da fertilidade do solo no Cerrado. *Scientia Agraria*, 17(3), 38-49.

Carvalho, P. S. M., de Assis Silva, S., Paiva, A. Q., Sodré, G. A., e Lima, J. S. S. (2018). Variabilidade espacial da fertilidade de um solo cultivado com cacaueteiro. *Revista Engenharia na Agricultura*, 26(2), 178-189.

Embrapa Solos UEP Recife. 2006. Disponível em: < <http://solos.uep.cnps.embrapa.br/> >. Acesso em: 30 de julho de 2020.

Freitas, J. R. B., Moitinho, M. R., De Bortoli Teixeira, D., da Silva Bicalho, E., da Silva, J. F., Siqueira, D. S., e Pereira, G. T. (2017). Soil factors influencing nematode spatial variability in soybean. *Agronomy Journal*, 109(2), 610-619.

Frenkel, H. Reassessment of water quality criteria for irrigation. In: Shainberg, I. e Shalhevet, J. (1984). *Soil salinity under irrigation: process and management*. Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo: Springer-Verlag.

Holanda, J. S.; Amorim, J. R. A., Ferreira Neto, M., Holanda, A. C., Sá, F. V. S. Qualidade da água para irrigação. In: Gheyi H. R., Dias, N. S., Lacerda, C. F., Domes Filho, E. (2016.) *Manejo da salinidade na agricultura: Estudo básico e aplicados*. Fortaleza: INCTSal.

Lacerda, C. F., Costa, R. N. T., Bezerra, M. A., Neves, A. L. R., Sousa, G. G., e Gheyi, H. R. Estratégias de manejo para uso de água salina na agricultura. In: Gheyi H. R., Dias, N. S., Lacerda, C. F., Domes Filho, E. (2016.) *Manejo da salinidade na agricultura: Estudo básico e aplicados*. Fortaleza: INCTSal.

Lundgren, W. J. C., Silva, J. A. A. D., e Ferreira, R. L. C. (2017). A Precisão da Estimativa do Erro da Krigagem pela Validação Cruzada. *Floresta e Ambiente*, 24(1). 1-12.

Marques, S. M., e Lima, C. G. R. (2017). Análise da Variação Espacial do Parâmetro pH no Aquífero Bauru nos anos 2010, 2011 e 2012. *Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista*, 13(4), 75-84.

Matias, S. S. R., Matos, A., Landim, J., Feitosa, S., Alves, M. A., e Silva, R. (2019). Recomendação de calagem com base na variabilidade espacial de atributos químicos do solo no Cerrado brasileiro. *Revista de Ciências Agrárias*, 42(4), 896-907.

Negreiros Neto, J. V., dos Santos, A. C., Guarnieri, A., Souza, D. J. D. A. T., Daronch, D. J., Dotto, M. A., e Araújo, A. S. (2014). Variabilidade espacial de atributos físico-químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico em sistema plantio direto. *Semina: Ciências Agrárias*, 35(1), 193-203.

Oliveira, I. A. D., Marques Junior, J., Campos, M. C. C., Aquino, R. E. D., Freitas, L. D., Siqueira, D. S., e Cunha, J. M. D. (2015). Variabilidade espacial e densidade amostral da suscetibilidade magnética e dos atributos de Argissolos da Região de Manicoré, AM. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 39(3), 668-681.

Pessoa, L. G. M., Freire, M. B. G. D. S., Wilcox, B. P., Green, C. H. M, Araújo, R. J. T., e Araújo Filho, J. C. (2016). Características de refletância espectral de solos do nordeste do Brasil influenciadas por níveis de salinidade. *Monitoramento e avaliação ambiental*, 188(11), 616.

Richards, L. A. (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. Califórnia: Agriculture handbook.

Rocha, J. M. L., dos Santos, A. C., de Oliveira, D. G., Júnior, O. S., da Silva, E. G., e Ferreira, C. L. S. (2017). Dinâmica espacial dos parâmetros físicos e químicos da água em viveiros de piscicultura. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, 12(3), 602-606.

Sá, I. I. S., Galvêncio, J. D., de Moura, M. S. B., & Sá, I. B. (2011). Avaliação da degradação ambiental na região do Araripe pernambucano utilizando técnicas de sensoriamento remoto. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 4(6), 1292-1314.

Santos, C. (2007). *Manual de auto-aprendizagem estatística descritiva*. Rio de Janeiro: Sílabo.

Souza, M., e Ribeiro, A. A. (2019). Qualidade da água para fins de irrigação em regiões áridas e semiáridas. *Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas*, 13(4), 355-359.2019.

Teixeira, P. C., Donagemma, G. K., Fontana, A., Teixeira, W. G. (2017). *Manual de métodos de análise de solo*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos.

Torres, M. M., de Aquino Lemos Filho, L. C., Ferreira, L. L. N., do Vale, C. N. C., Franco, M. S. D. B. P., e Oliveira Júnior, R. F. (2016). Análise espacial e estabilidade temporal da armazenagem de água em Cambissolo da região do Vale do Açu, RN. *Water Resources and Irrigation Management-WRIM*, 5(2), 41-49.

Vicente, G. Z., Lima, C. G. R., e Marques, S. M. (2018). Variabilidade espacial e temporal do Nitrato e Cloreto no Sistema Aquífero Bauru, estado de São Paulo. *Águas Subterrâneas*, 32(3), 295-306.

Warrick, A.W. e Nielsen, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. *In: Hillel, D. (1980). Applications of soil physics*. New York: Academic Press.

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Erismar Vieira Moreira – 16,66%

Gilberto Saraiva Tavares Filho – 16,66%

Fabio Freire de Oliveira – 16,66%

Francisco Avelar Pereira Júnior – 16,66%

Cícero Antônio de Sousa Araújo – 16,66%

Sammy Sidney Rocha Matias – 16,66%