

ANÁLISE DA DEPENDÊNCIA ESPACIAL ENTRE AS ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS NO SEMIÁRIDO DA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO UTILIZANDO A GEOESTATÍSTICA

Rosani Brune de Almeida Dias

Universidade Federal do Maranhão, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, São Luís, MA, Brasil
rosani.brune@ufma.br

Antônio Alves Dias Neto

Universidade Federal do Maranhão, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, São Luís, MA, Brasil
antonio.dias@ufma.br

Andrea Sousa Fontes

Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, Salvador, BA, Brasil
asfontes@ufba.br

RESUMO

A análise espacial dos dados proporciona maior compreensão sobre a abrangência territorial de informações medidas que tenham relação na superfície em estudo, fundamental para obter estimativas de chuvas de regiões. Considerando a importância da bacia do rio São Francisco para a região do Nordeste e semiárida do Brasil e pela contribuição que a análise espacial fornece, foram realizadas análises da dependência espaço das chuvas medidas em estações pluviométricas. Para averiguar a relação espacial da precipitação na área em questão foram selecionadas 231 estações pluviométricas no período de 1968 a 1983 e analisadas por meio da composição de semivariogramas considerando as médias mensais de chuva em cada ano. Os resultados mostram diferença na dependência espacial ao longo dos anos, considerando os dezesseis anos, seis não apresentaram dependência espacial (1970, 1971, 1974, 1976, 1978 e 1979), nos dez anos que foi possível ajustar o modelo do semivariograma experimental, foram obtidos diferentes valores para os alcances (distâncias), ou seja, as relações espaciais variam ao longo do tempo. Esses resultados comprovam a variabilidade da estrutura espacial da chuva na região, e as análises contribuíram para compreender que há variação da influência de acordo com o ano no comportamento das precipitações na região semiárida do São Francisco.

Palavras-chave: Semivariograma. Variabilidade espacial. Variabilidade temporal. Precipitação.

SPATIAL DEPENDENCY ANALYSIS IN RAINFALL STATIONS IN THE SEMI-ARID REGION OF THE SÃO FRANCISCO RIVER BASIN USING GEOSTATISTICS

ABSTRACT

Spatial data analysis provides understanding of the territorial scope of measured information that study making it essential to obtain estimates of the occurrence of rainfall in regions. Considering the importance watershed of the São Francisco river of Brazil and for the contribution that spatial data analysis provides, analyzes of the spatial dependence of rainfall measured at rainfall stations were carried out. In order to ascertain the spatial relation of precipitation in the area in question, 231 rain gauge stations were selected from 1968 to 1983 and analyzed through the composition of semivariograms considering the monthly rainfall averages in each year. The results show a large difference in spatial dependence over the years, considering the sixteen years, six did not show spatial dependence (1970, 1971, 1974, 1976, 1978 and 1979), in the ten years that it was possible to adjust the experimental semivariogram model, different values were obtained for the ranges (distances), that is, the spatial relations vary over time. The variability of the spatial structure of rainfall in the region, and the analyzes contributed to understanding that there is variation in influence depending on the year on the behavior of precipitation in the semi-arid region of São Francisco.

Keywords: Semivariogram. Spatial variability. Temporal variability. Precipitation.

INTRODUÇÃO

A importância de avaliar a dependência espacial das chuvas medidas nos diferentes pluviômetros, reside em observar as áreas nas quais a localização do pluviômetro permita ser atribuídas à determinado comportamento das chuvas, e as áreas nas quais não estão cobertas pela coleta de dados dos pluviômetros instalados na região, assim pouco contribuindo para os estudos hidroclimatológicos.

A complexidade em entender a variabilidade espacial das chuvas de uma região está não somente ligada a localização dos pluviômetros, mas também à existência de diversas variáveis que podem interferir no monitoramento hidroclimatológico, inclusive a falta de disponibilidade de dados para quantificar e identificar a relação espacial das precipitações (Rodrigues e Silans, 2001).

A relação espacial entre estações hidroclimáticas não são iguais em todos os períodos (anos), sendo que a chuva apresenta maior variabilidade espaço-temporal dentre as variáveis do sistema meteorológico (Almeida, 2011). Na região semiárida a distribuição da precipitação é ainda mais irregular, havendo longos períodos de estiagem, influenciados pelo sistema meteorológico, por exemplo a Zona de Convergência Intertropical e os vórtices ciclônicos, considerando ainda os El Niño e La Niña (Rodrigues, et al., 2021).

Em regiões semiáridas esse problema é agravado, pois há grande dificuldade na quantificação dos dados; alta variabilidade das chuvas e altos índices de evapotranspiração. Para a quantificação dos dados requereria um número de estações hidroclimáticas que conseguisse contemplar a região de maneira a identificar o comportamento espacial da chuva, mas demandaria tempo e custos elevados (Tucci, 2017), dificultando o levantamento dessas informações. A região semiárida é caracterizada pela grande variabilidade espacial das chuvas no espaço e tempo, provocando períodos de estiagem prolongados e afetando o desenvolvimento econômico, social e ambiental. Tendo um déficit hídrico que chega a 2.500 mm ao ano, essas desigualdades são reforçadas, além da grande perda de água através da evapotranspiração (Ana, 2012).

Essas características são inerentes da região semiárida da bacia hidrográfica do rio São Francisco, o que torna ideal para realizar a análise da dependência espacial das chuvas medidas em estações pluviométricas localizadas nessa área para definir se há relação espacial em regiões com essas características. A bacia do rio São Francisco fica situada entre as latitudes 7°00' e 21°00' S e as longitudes 35°00' e 47°40' W, possui uma área de 639.219 km², correspondendo a 8% de todo o território do Brasil, abrangendo seis estados brasileiros (Alagoas, Bahia, Goiás, Minas Gerais, Pernambuco e Sergipe) e 505 municípios. Aproximadamente 54% dessa bacia hidrográfica tem o seu território localizado pela região semiárida, a qual apresenta grande vulnerabilidade hídrica e social (CBHSF, 2023).

A extensão do rio São Francisco tem aproximadamente a 2.863 km, a qual se estende da Serra da Canastra no Estado de Minas Gerais desaguando no Oceano Atlântico entre os estados nordestinos Alagoas e Sergipe (CBHSF, 2023). O rio São Francisco tem grande volume e perenidade garantindo condições de navegabilidade, produção de energia e disponibilidade hídrica para diversos outros fins na região.

Para alcançar o objetivo geral de avaliar a dependência espacial das precipitações na região semiárida da bacia hidrográfica do rio São Francisco, foram seguidos os seguintes objetivos específicos: 1. Determinar o período com menor número de falhas para realizar o estudo: 2. Fazer o preenchimento de falhas caso seja necessário: 3. Definir os períodos de análise, especializar a distribuição das estações: 4. Definir os variogramas para cada período 5. Determinar os alcances observando quais períodos tiveram relação espacial.

METODOLOGIA

A relação espacial refere-se à dependência ou a correlação entre pontos de medições distribuídos geograficamente, assim as estações pluviométricas podem ser entendidas como uma estação, em certa localidade, cujos dados pluviométricos obtidos podem se assemelhar com dados obtidos nas estações vizinhas, considerando o princípio da dependência espacial, de que quanto mais próximos os locais de medição, mais parecidos serão (Holawe; Dutter, 1999). A possibilidade de estimar a distribuição espacial das chuvas a partir de medições pontuais, depende das relações espaciais existentes, e que devem ser interpretadas, dos valores medidos no ponto (Bacchi e Kottegoda, 1995). Para relacionar as estações pluviométricas espacialmente recomenda-se a utilização do método geoestatístico (Guimarães; Alves, 2023).

Método geoestatístico

O método geoestatístico, proposto por Matheron, em 1963, descreve a variabilidade espacial dos fenômenos, isso faz com que a dependência espacial de pontos amostrais possa ser representada, por meio da função do semivariograma. Essa função representa como a semivariância de um fenômeno se comporta no espaço em relação à distância dos pontos de medição (Vieira, 1995).

A espacialização da variação de um fenômeno pode ser representada pela função do semivariograma quantitativamente (Huijbregts, 1975).

Considerando uma amostra $z(x_i)$, $i=1, 2, \dots, n$, o semivariograma pode ser estimado pela Equação 1.

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

onde:

$\hat{\gamma}(h)$ a estimativa do semivariograma;

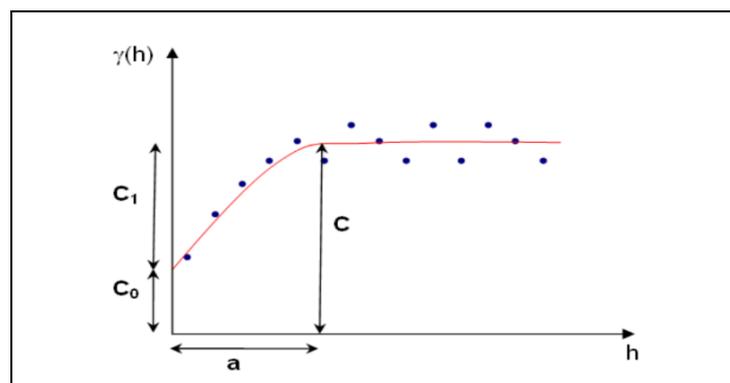
$N(h)$ o número de pares de valores medidos,

$z(x_i)$ e $z(x_i+h)$, separados por um vetor distância h ;

$z(x_i)$ e $z(x_i+h)$ os valores da i -ésima observação da variável regionalizada, coletados nos pontos x_i e x_i+h ($i=1, \dots, n$), separados pelo vetor h .

Espera-se que amostras mais próximas geograficamente tenham comportamentos mais parecidos, enquanto as amostras mais distantes sejam mais diferentes, assim ocorrendo uma alteração na variabilidade a medida em que as distâncias aumentam. Essa variabilidade, medida por meio do semivariograma, possui eixo das ordenadas representada pelos valores da semivariância e o eixo das abscissas representada pela distância entre as amostras. No semivariograma há diferentes parâmetros que o compõem e que servem para caracterizá-lo, conforme pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 - Semivariograma experimental



Fonte: Adaptado de Camargo (2006).

O alcance: vai fornecer distância máxima onde há relação espacial entre os pontos (correlação espacial), ou seja, a partir desse ponto não haverá relação espacial; o patamar (C): esse parâmetro irá definir o alcance por meio do valor do semivariograma, é definida pela diferença entre o patamar e o efeito pepita; a contribuição do efeito pepita (C_0) e da variância estrutural (C_1) vão estabelecer o valor aproximado da variância dos dados, caso exista. O efeito pepita é descontinuidade do semivariograma no caso em que as

distâncias entre os pontos sejam menores do que a menor distância entre os pontos de medição. Quando existe ausência total de dependência espacial entre os pontos o valor de C_0 será cada vez mais perto do patamar, isso é chamado de efeito pepita puro.

Com relação aos parâmetros têm-se: “quanto menor for a proporção do efeito pepita para o patamar do semivariograma, maior a continuidade do fenômeno, menor a variância da estimativa ou maior a confiança que se pode ter na estimativa” (Guimarães, 2004, p. 50).

O semivariograma é ajustado por meio de modelos teóricos para estabelecer a relação espacial sendo ajustado manualmente e/ou automaticamente.

O procedimento de ajuste não é direto e automático, como no caso de uma regressão, por exemplo, mas sim interativo, pois nesse processo o intérprete faz um primeiro ajuste e verifica a adequação do modelo teórico, dependendo do ajuste obtido, pode ou não redefinir o modelo, até obter um que seja considerado satisfatório (Camargo, 1998, p.10).

Os modelos para estabelecer a relação espacial mais utilizados são o esférico, o gaussiano e o exponencial. As suas funções são: Modelo Esférico (Equação 2), Modelo Gaussiano (Equação 3) e Modelo Sequencial (Equação 4).

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & |h| = 0 \\ \frac{3|h|}{2a} - \frac{h^3}{2a^2} & 0 < |h| \leq a \\ 1 & |h| > a \end{cases} \quad (2)$$

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & |h| = 0 \\ 1 - \exp\left(-\frac{|h|}{a}\right) & \forall h \in R^* \end{cases} \quad (3)$$

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & |h| = 0 \\ 1 - \exp\left(-\frac{|h|^2}{a^2}\right) & \forall h \in R^* \end{cases} \quad (4)$$

Para ajustar os modelos podemos utilizar ajustes realizados por somente por “sentimento”, automáticos ou mistos, onde utilizam os dois métodos em que o primeiro é feito um ajuste pelo primeiro método e depois poderá ser verificado pelo método automático e assim observar se fica mais adequado, esse processo pode ser repetido até que obtenha um modelo satisfatório (Avalos, 2003; Camargo, 2006).

No estudo, os modelos foram ajustados incluindo os dois métodos, (misto) para o ajuste dos semivariogramas, foram estabelecidos anteriormente os valores dos parâmetros posteriormente realizados os ajustes do método automático para que o valor do R^2 fosse maximizando, sendo apresentados pelas Equações de 5 a 7.

$$SQR = \sum_{i=1}^n (\hat{\gamma}(h) - (\gamma(h)))^2 \quad (5)$$

$$SQT = \sum_{i=1}^n (\hat{\gamma}(h) - (\bar{\gamma}(h)))^2 \quad (6)$$

$$R^2 = 1 - (SQR - SQT) \quad (7)$$

onde:

SQR é a soma de quadrados da equação de ajuste;

SQT é a soma de quadrados totais;

$\bar{\gamma}(h)$ é a média dos valores estimados do semivariograma ($\hat{\gamma}(h)$)

Cambardella (1994) classifica a dependência espacial em forte, moderada e fraca. Esse grau de dependência é determinado a partir da razão do efeito pepita pelo patamar. A classificação dos semivariogramas através do efeito pepita será dada por: 25% do patamar determina forte relação espacial, quando está entre 25 e 75% é considerada moderada e de fraca quando >75%.

Caracterização da área de estudo

A região analisada foi a bacia hidrográfica do São Francisco, considerando a importância que representa para o Nordeste, com disponibilidade hídrica de 1.886 m³/s correspondente a 70% da oferta do Nordeste (Pruski, 2005).

A área de drenagem da bacia do São Francisco representa 639.219 km², com uma extensão de 2.863 km, nascendo no estado de Minas Gerais (Serra da Canastra) e escoar no sentido sul-norte passando pelos estados de Goiás, Bahia e Pernambuco, até desaguar entre os estados de Alagoas e Sergipe (CBHSF, 2023).

A região semiárida do São Francisco é uma região com vulnerabilidade de acesso a água para muitas famílias nordestinas, daí a importância de compreendermos de forma mais aprofundada os fenômenos de chuva. Devido à alta variabilidade da chuva e altas taxas de evapotranspiração, além de outras características físicas e hidroclimatológicas como, baixas temperaturas, alta evapotranspiração, erosão, baixa capacidade de retenção da água, entre outras, que provocam a escassez hídrica essa região tornou-se o foco do estudo.

Essa região alcança a maior parte da região Nordeste do país, mas abrange um trecho importante do norte de Minas Gerais. A região semiárida da bacia do rio São Francisco abrange 54% de sua área total, pouco mais de 345 mil km², compreendendo 218 municípios.

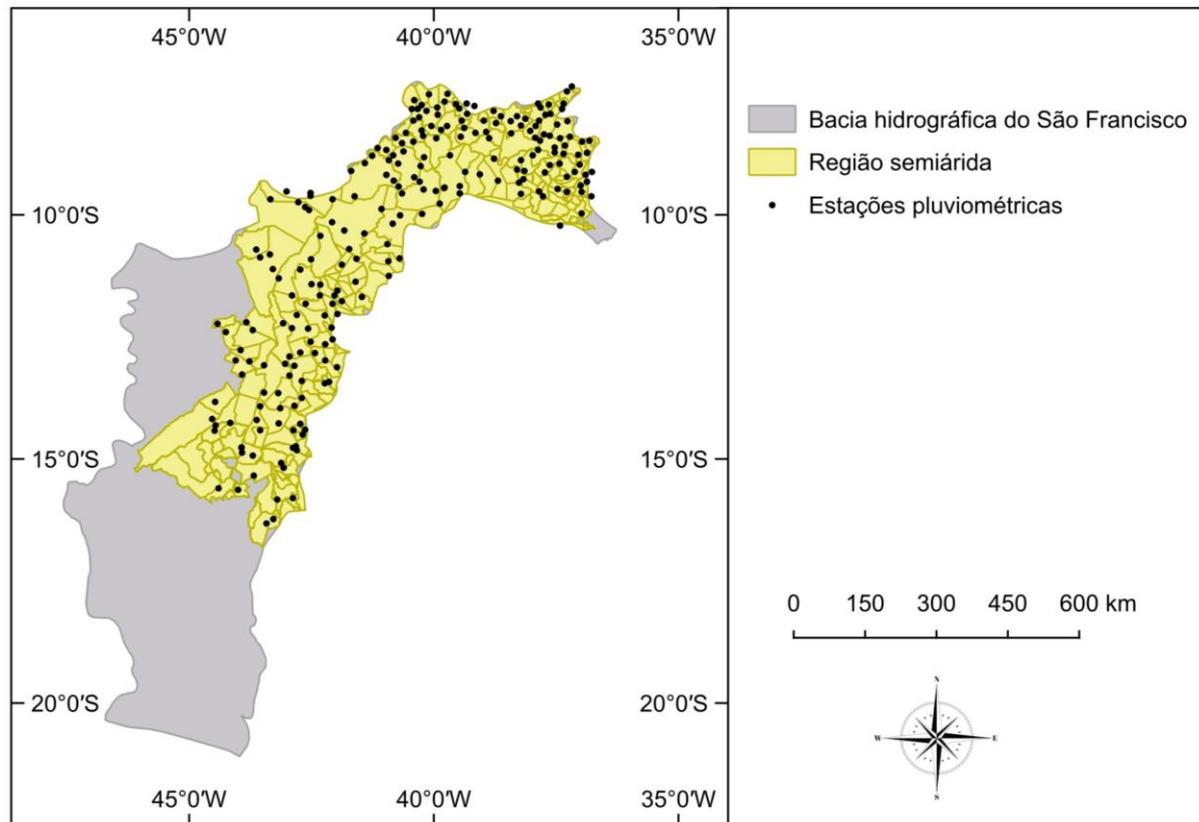
Para analisar a relação espacial no semiárido da bacia do São Francisco foram utilizados dados de precipitação medidos em 231 estações pluviométricas distribuídas na região Semiárida da bacia hidrográfica do São Francisco (Figura 2), no período de janeiro de 1968 a dezembro de 1983, que foi escolhido pela concentração da disponibilidade de informações. Após obter os dados na ANA, observou-se que as informações são escassas e esparsas sobre a precipitação, assim o corte desse período foi realizado devido a maior volume de informações.

Foi realizada a análise espaço-temporal das precipitações, por meio de semivariogramas das médias mensais em cada ano no período mencionado. Para essas análises foi utilizado o banco de dados fornecido pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Os dados são medidas do acumulado diário de precipitação, após delimitar o período que continha menor número de falhas no tempo, as eventuais falhas foram preenchidas, utilizando o método de ponderação regional apresentado por Tucci (2017). O software utilizado para traçar o mapa (Figura2) e fazer a análise com o método de geoestatística, foi o ArcGIS. Os parâmetros dos semivariogramas, de cada ano, foram observados para uma discussão da relação espacial estabelecida na região.

Conforme recomendado por Camargo (2006), nesse estudo foi utilizado o processo misto, primeiro foram realizados ajustes dos semivariogramas dos modelos (esférico, gaussiano e exponencial), para estabelecer seus parâmetros (patamar, alcance e efeito pepita) foi utilizado o critério de "sentimento", ou seja, foram estabelecidos alguns valores para os parâmetros, de acordo com o resultado do semivariograma, e ajustados, posteriormente, considerando o critério automático que maximiza o valor de R², esse processo se caracteriza como método misto.

O procedimento de ajuste não é direto e automático, como no caso de uma regressão, por exemplo, mas sim interativo, pois nesse processo o intérprete faz um primeiro ajuste e verifica a adequação do modelo teórico. Dependendo do ajuste obtido, pode ou não redefinir o modelo, até obter um que seja considerado satisfatório (Camargo, 2006, p. 10).

Figura 2 - Semiárido da bacia do rio São Francisco: Distribuição espacial das estações pluviométricas distribuídas no semiárido



Fonte: Os autores, (2023).

Para a caracterização da relação espacial das estações pluviométricas foram analisados os semivariogramas anuais da região semiárida da bacia do rio São Francisco, no período de 1968 a 1983. Para analisar o comportamento médio da região, em cada ano, foram realizadas estatísticas descritivas, tais como: média, desvio padrão, máximo, mínimo e coeficiente de variação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com as estatísticas descritivas (Quadro 1) podemos observar grande variação de precipitação da região para cada ano, isso pode ser observado através dos valores médios, máximos e mínimos nas precipitações mensais acumuladas. O ano com maior precipitação média anual registrada na região semiárida da bacia do rio São Francisco foi em 1974, com 909,9 mm. A menor precipitação média anual registrada foi de 395,5 mm no ano de 1982. Nesse mesmo ano também foi registrada a ocorrência da menor chuva acumulada entre os anos correspondente a 22 mm. No ano de 1979, dentre os anos analisados, foi registrada a maior chuva em um mês no valor de 2538,1 mm.

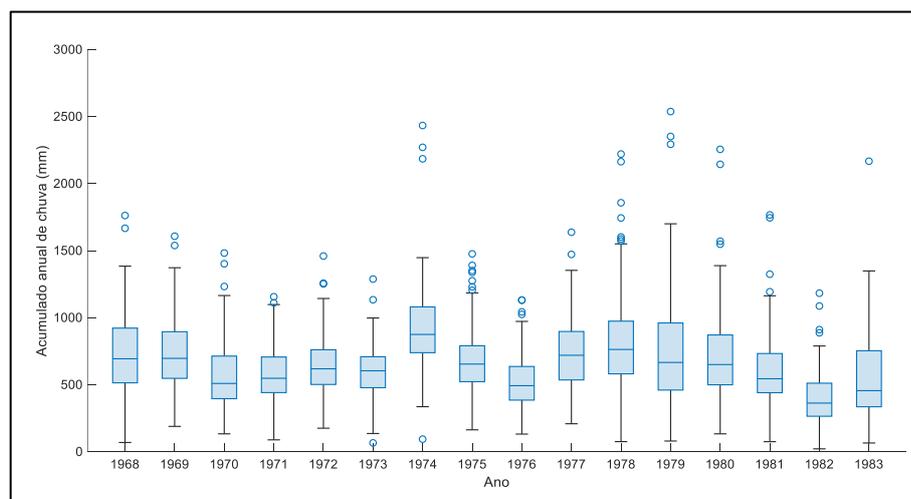
Quadro 1 - Estatística descritiva do acumulado anual da precipitação (mm) medida na região semiárida do São Francisco

Ano	Média	Mediana	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação	Máximo	Mínimo
1968	726,4	694,1	281,2	39%	1.762,80	69,6
1969	732,3	697,3	251,8	34%	1.608,30	189,6
1970	575,5	509,9	241,0	42%	1.482,60	134,0
1971	581,0	548,5	207,1	36%	1.156,60	89,1
1972	641,8	619,3	200,0	31%	1.460,50	176,0
1973	600,7	604,5	183,9	31%	1.288,70	66,4
1974	909,9	875,5	277,8	31%	2.434,19	94,4
1975	677,2	654,7	225,1	33%	1.476,50	163,9
1976	517,3	493,3	185,5	36%	1.131,40	132,2
1977	739,8	720,2	238,5	32%	1.638,00	209,3
1978	812,8	763,6	330,4	41%	2.221,20	75,9
1979	744,0	666,6	373,5	50%	2.538,10	80,4
1980	719,3	650,9	308,3	43%	2.256,30	134,0
1981	604,3	545,1	246,2	41%	1.767,00	75,5
1982	395,5	363,4	184,8	47%	1.183,20	22,0
1983	543,0	456,3	289,4	53%	2.167,70	65,8

Fonte: Os autores, (2023).

O coeficiente de variação (CV) mede o grau de discrepância dos valores medidos, assim o CV para a região do semiárido do São Francisco apresenta variação ao longo do tempo que representa de 31% a 53% de variação entre os anos analisados, nos estudos de Silva, Pereira e Almeida (2012), os valores de CVs encontrados para região semiárida nordestina varia entre 35% a 90%, mostrando como os valores de precipitação na região apresentam grande discrepância no espaço e tempo. Os dados apresentados no *box plot* (Figura 3), mostram a complexidade da variação da chuva nessa região, isso pode ser observado na variação dos anos em que as medianas são muito diferentes, a concentração da chuva acumulada percentil 50%, assimetria e valores extremos.

Figura 3 - *Box plot* do acumulado anual de chuva (mm) das 231 estações pluviométricas para os anos de 1968 a 1983, na região semiárida da bacia do rio São Francisco



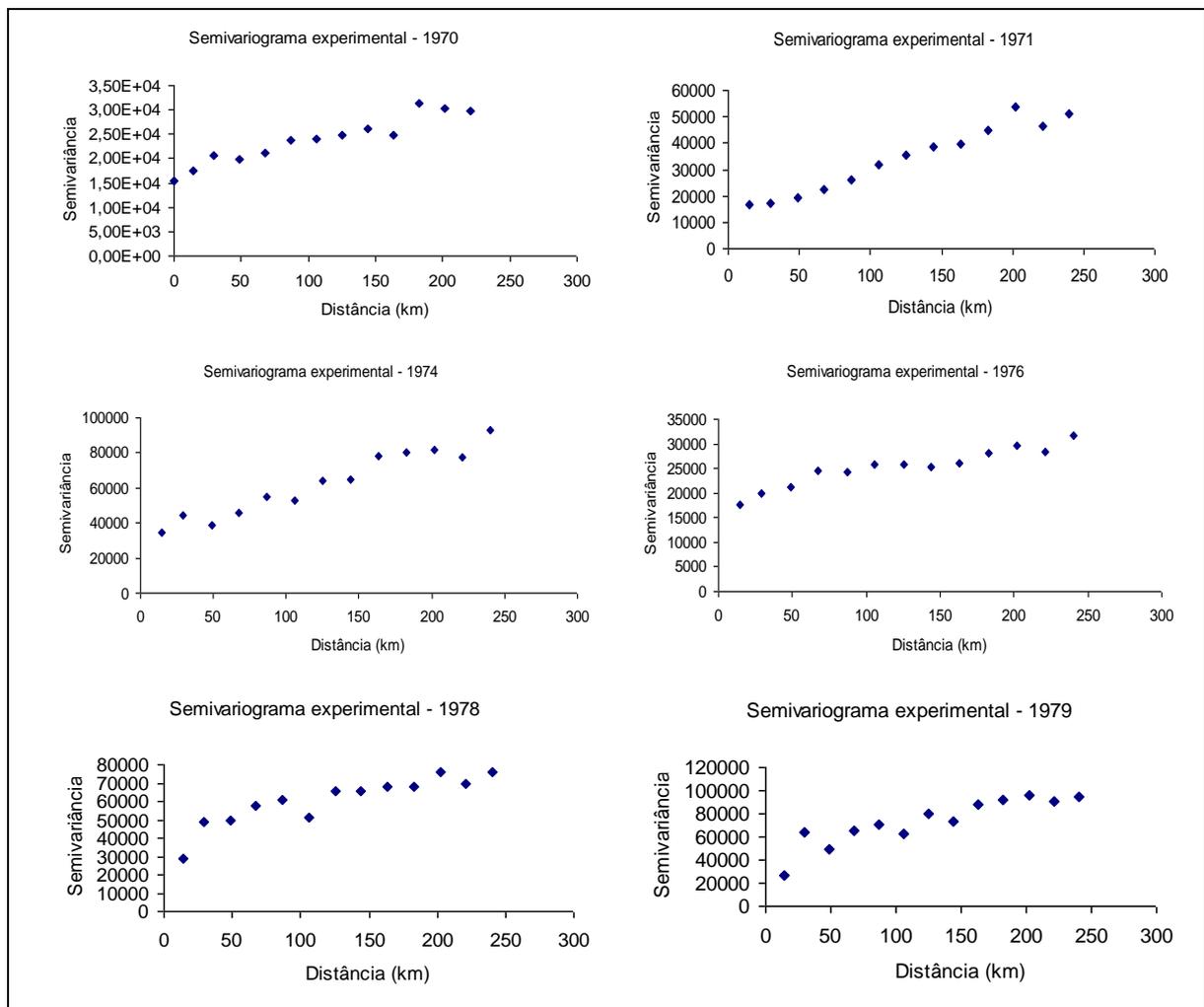
Fonte: Os autores, (2023).

Esses *boxes plots* apresentam o comportamento do acumulado das precipitações anuais nas estações pluviométricas distribuídas espacialmente na região. Pode-se observar que há valores extremos em todos os anos de análise, ou seja, valores de chuvas extremas máximas para todos os anos e mínimas para os anos de 1973 e 1974.

A relação espacial da chuva no semiárido da bacia do rio São Francisco durante os anos estudados foi analisada construindo-se semivariogramas experimentais das médias anuais por estações pluviométricas, considerando 231 estações distribuídas na região semiárida da bacia do rio São Francisco.

Considerando os semivariogramas anuais para o período de análise estabelecido, verifica-se que a relação espacial da chuva na região semiárida do São Francisco pode ser encontrada apenas em alguns anos. Os semivariogramas experimentais apresentam os anos que foram observadas a falta de ajustes (Figura 4).

Figura 4 - Semivariogramas experimentais para os anos de 1970, 1971, 1974, 1976, 1978 e 1979



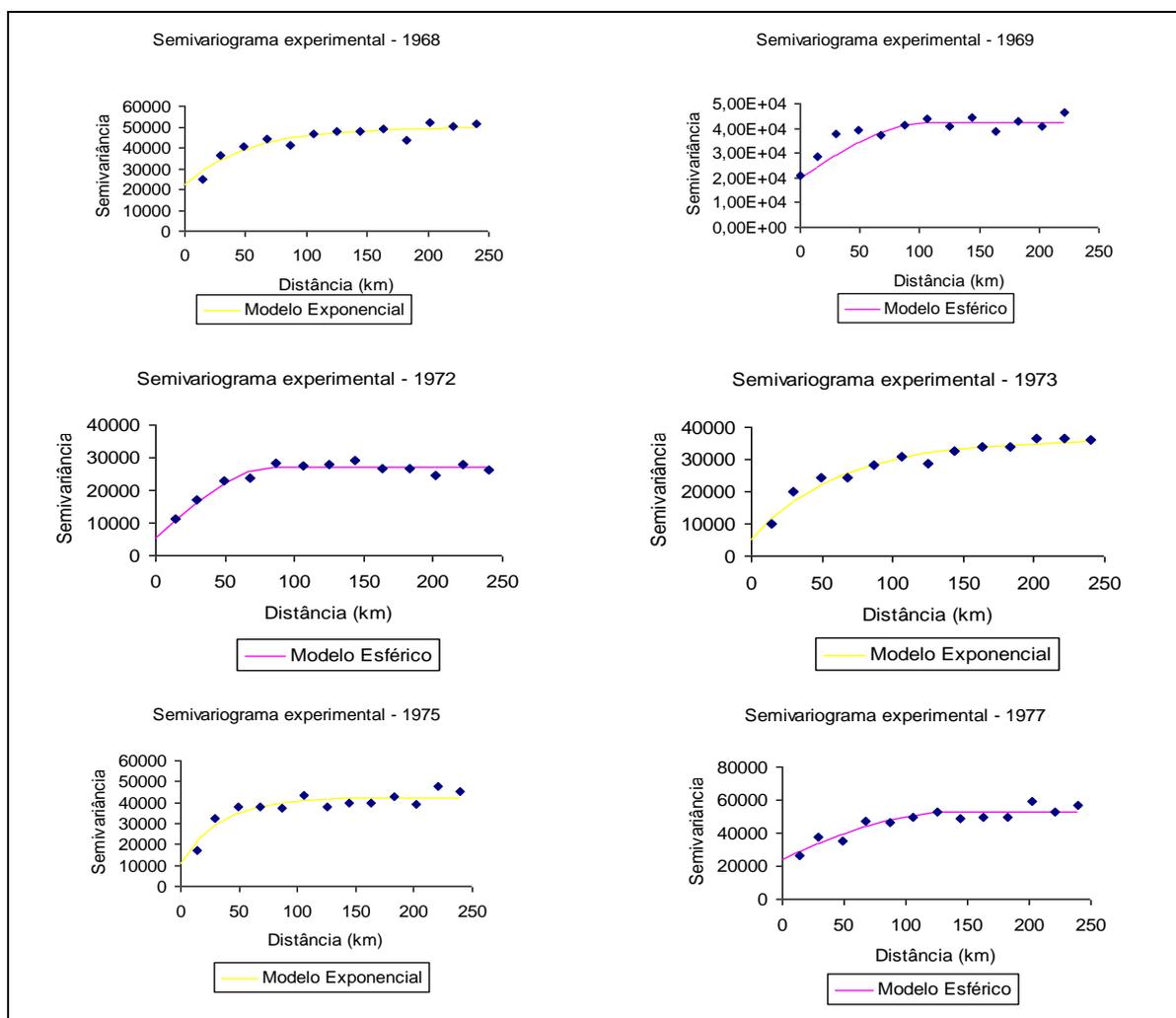
Fonte: Os autores, (2023).

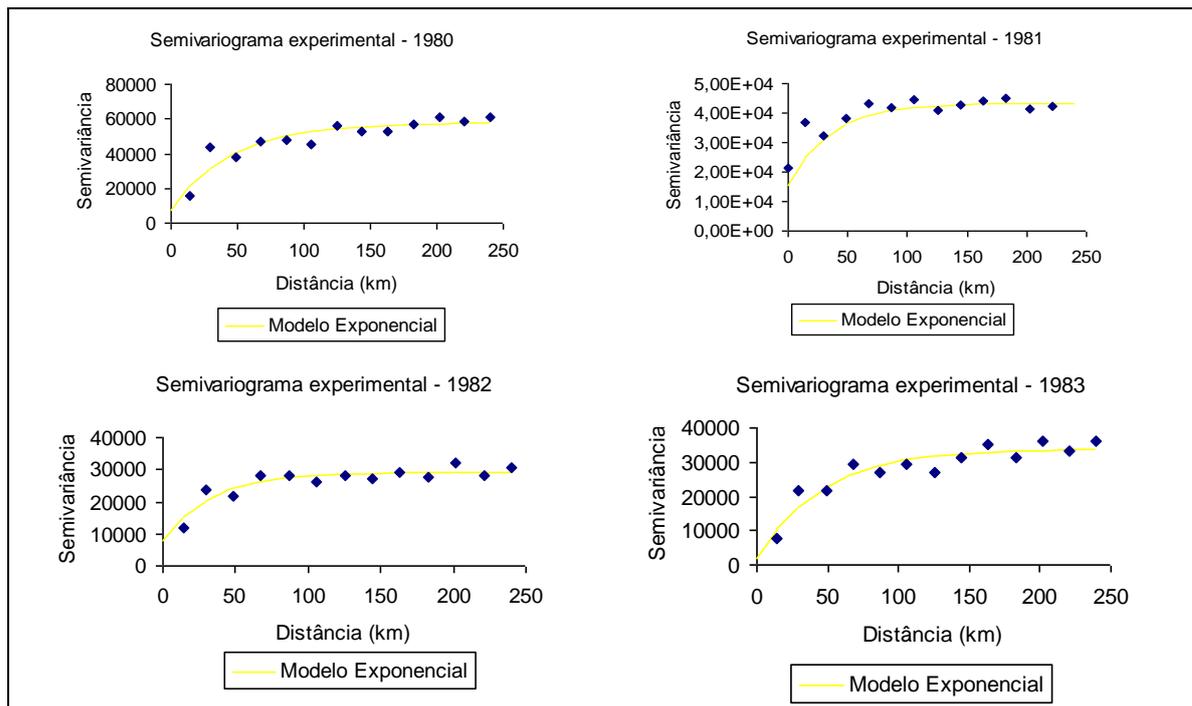
Para os anos de 1970, 1971, 1974, 1976, 1978 e 1979 não foram encontradas relações espaciais, pois o patamar não pôde ser alcançado. Sendo assim para esses anos não há relação espacial entre as estações pluviométricas, ou seja, a distribuição espacial das estações possui efeito pepita puro. Segundo Trangmar et al. (1985), isso pode indicar a falta de estacionaridade e presença de tendências, em outros casos pode ocorrer ausência da estrutura espacial causada, possivelmente, pela escala da amostragem usada.

Para esses anos foram eliminadas a primeira e segunda tendências para saber se os semivariogramas alcançavam o patamar. Mesmo eliminando as tendências os semivariogramas mostraram a mesma estrutura espacial, não sendo possível estabelecer qualquer tipo de dependência espacial. Isso pode ser caracterizado pela total ausência de relação espacial em alguns anos nessa região, o que não seria impossível devido à grande variabilidade espaço-temporal encontrada na região; ou ainda pelo número de estações utilizado, ou seja, o número de 231 estações nessa região em alguns anos não seria suficiente para detectar uma relação espacial. Segundo Carvalho & Egler (2003), as variabilidades espaciais podem ser afetadas pelas secas parciais anuais, em que as chuvas são intensas em certas áreas da região e com pouca intensidade ou ausentes em outras áreas do semiárido.

Para os outros anos de análise a relação espacial foi encontrada. A Figura 5 apresenta os semivariogramas para esses anos e seus respectivos modelos de ajuste. O modelo exponencial é o que possui maior número de ajustes (sete), o esférico possui três anos com o ajuste e o modelo gaussiano não foi ajustado a nenhum ano.

Figura 5 - Semivariogramas experimentais para os anos de 1968 a 1983





Fonte: Os autores, (2023).

A característica do modelo exponencial é descrita pelo crescimento mais lento da origem em direção ao patamar, assim não podemos afirmar que esse modelo atinge de fato o patamar (Lamparelli *et al.*, 2001). Isso representa a maneira menos rápida com a qual é diminuída a influência de uma amostra em relação às zonas mais afastadas.

O esférico cresce mais rapidamente, e o patamar e o alcance é identificado de forma mais clara e efeito pepita é geralmente é pequeno em relação a este patamar (Lamparelli *et al.*, 2001). Isso quer dizer que as amostras mais próximas têm maior influência em relação às amostras mais afastada, ou seja, mostra maior similaridade com amostras mais próximas, de acordo com os modelos ajustados e seus respectivos parâmetros (Quadro 2).

Quadro 2 - Parâmetros ajustados aos semivariogramas experimentais

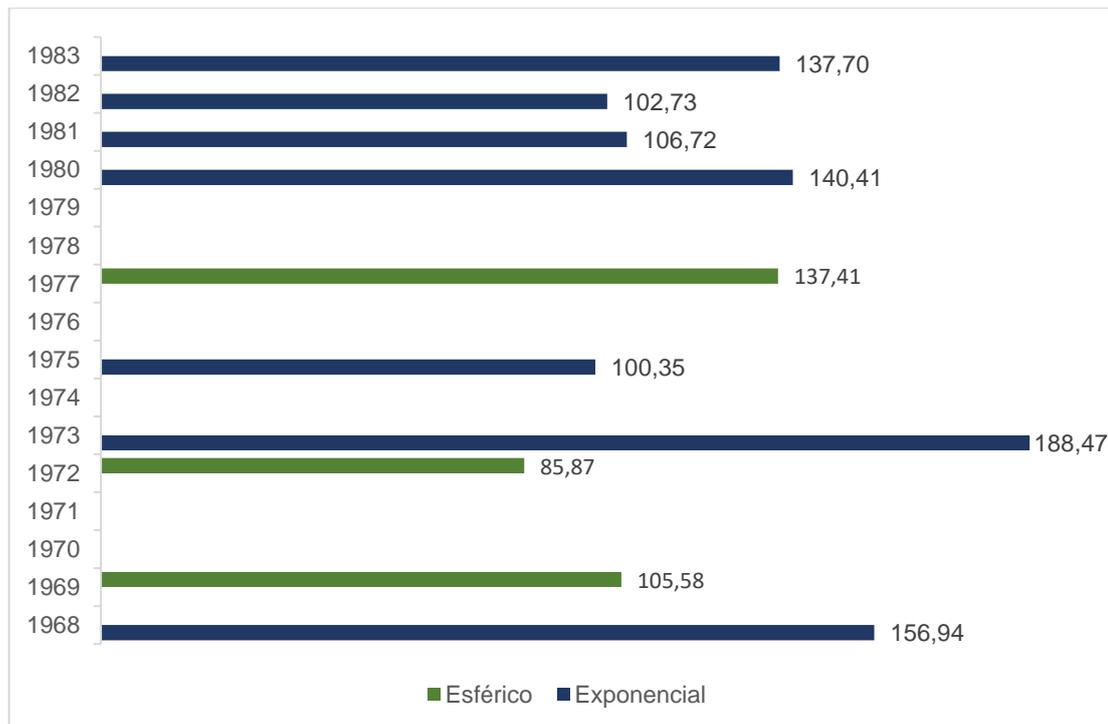
Ano	Modelo	C ₀	C ₁	a	R ²	Grau de Relação Espacial
1968	Exponencial	22.167,61	27763,54	156,94	0,88	0,44
1969	Esférico	19.769,53	22386,91	105,58	0,86	0,47
1970	-	-	-	-	-	-
1971	-	-	-	-	-	-
1972	Esférico	5.523,02	21642,25	85,87	0,96	0,20
1973	Exponencial	5.322,41	30890,99	188,47	0,95	0,15
1974	-	-	-	-	-	-
1975	Exponencial	11.171,83	31200,60	100,35	0,81	0,26
1976	-	-	-	-	-	-
1977	Esférico	24.395,34	28346,49	137,41	0,85	0,46
1978	-	-	-	-	-	-
1979	-	-	-	-	-	-
1980	Exponencial	7.649,57	50262,88	140,41	0,84	0,13
1981	Exponencial	15.484,33	27794,39	106,72	0,82	0,36
1982	Exponencial	8.021,54	21068,70	102,73	0,83	0,28
1983	Exponencial	2.044,60	31750,68	137,70	0,88	0,06

Fonte: Os autores, (2023).

Considerando a classificação de dependência espacial, nos anos de 1972, 1973, 1980 e 1983 têm relação espacial forte, enquanto os anos 1968, 1969, 1975, 1977, 1981 e 1982 têm essa relação moderada.

Os alcances são os valores que determinam até que distância uma estação pluviométrica é espacialmente relacionada. Há certa variação dos alcances para os anos analisados, os semivariogramas estão variando de 85,87 a 188,47 km (Figura 6).

Figura 6 - Alcances obtidos pelos semivariogramas experimentais para os anos de 1968, 1969, 1972, 1973, 1975, 1977, 1980, 1981, 1982 e 1983



Fonte: Os autores, (2023).

De acordo com os alcances encontrados, podemos observar que em cada ano esses valores são diferentes, o que indica que o comportamento da precipitação muda não só espacialmente, mas também no tempo. A chuva na região semiárida da bacia do São Francisco tem uma variação espacial em relação aos anos analisados. Além da variação da área de influência da chuva em cada ano, existe, também, anos em que a chuva pode ser considerada como uma variável aleatória, ou seja, não há um padrão espacial de comportamento.

Em estudos realizados na região Nordeste e no semiárido da bacia do rio São Francisco por Miranda et al. (2004) e Almeida (2008), respectivamente, mostram a relação espacial de alcances com dimensões semelhantes. Miranda et al. (2004), utilizam dados de chuva diária da região Nordeste brasileiro para determinar a correlação espacial das estações através da função do semivariograma, chegando à um alcance de aproximadamente 150 km. Almeida (2008) descreveu o comportamento espacial considerando os períodos úmido e seco, com alcances estabelecidos em 240,74 km e 112,61 km respectivamente. Esse estudo mostra que os alcances encontrados são diferentes ao longo dos anos estudados, indicando que a distância de influência das estações se modificam no tempo e no espaço, uma vez que os ajustes dos semivariogramas também apresentam modelos diferentes no período do estudo, isso pode ser explicado pela influência climática na região. Estudos mais aprofundados podem ser realizados para compreender melhor sobre essa variabilidade na área, além de realizar variogramas climáticos (incluindo outras variáveis de influência) para tornar o ajuste mais precisos e contribuir com o entendimento sobre a precipitação na região semiárida do São Francisco, com isso pode ficar mais evidente se existe realmente a ausência de ajustes nos anos que não apresentaram o alcance, outra possibilidade é a necessidade de implantar mais

estações de medições, uma vez que, dependendo do comportamento desses anos pode ser que a área de influência seja menor.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nos anos 1970, 1971, 1974, 1976, 1978 e 1979 não foram constatadas relação espacial entre as estações pluviométricas. De acordo com a estrutura dos semivariogramas os dados poderiam ser influenciados por alguma tendência. Sendo assim, a tendência linear e quadrática foram eliminadas das médias de precipitações desses anos. Mesmo a tendência sendo retirada os semivariogramas apresentaram o mesmo padrão. Nesses anos os dados disponibilizados não foram insuficientes determinar relação espacial das estações pluviométricas no semiárido da bacia do rio São Francisco. Sinalizando a fragilidade numérica dos dados e da abrangência da cobertura espacial dos pluviômetros instalados e em funcionamento na região em estudo.

Em sete anos (1968, 1973, 1975, 1980, 1981, 1982 e 1983) foi possível obter o ajuste dos dados no modelo do tipo exponencial. Sendo assim, seus alcances para cada ano foram de 156,94; 188,47; 100,35; 140,41; 106,72; 102,73 e 137,70, respectivamente. Os alcances para esses anos estão relativamente próximos. Esse modelo demonstra que, para esses anos, a influência das estações distantes é diminuída mais lentamente.

Considerando três anos (1969, 1972 e 1977), o modelo encontrado foi o esférico. O raio que determina a área de influência para esses anos foi em quilômetros de 105, 58; 85,87 e 137,41 respectivamente. Para esse modelo, o alcance é atingido mais rapidamente, mostrando que amostras mais próximas apresentaram maior influência nesses anos.

Então, para a região semiárida da bacia do rio São Francisco ao longo dos anos ocorre variação do alcance espacial (quando há). Isso pode ser representado pelos diferentes tipos de modelos ajustados, e em relação à variação dos alcances, mesmo para modelos iguais, ao longo do período analisado (1968 a 1983). Essa variação pode ser observada através do *box plot* da região, além do uso da estatística descritiva.

Considerando as funções por meio dos semivariogramas, podemos obter modelos de interpolação mais robustos para a espacialização da variável nessa região semiárida.

Existe uma limitação clara da aplicação da geoestatística no semiárido da bacia do rio São Francisco quando se trata da variação da chuva nessa região. Isso é demonstrado através da falta de ajuste de alguns semivariogramas, ou seja, a técnica não poderia ser utilizada em alguns anos pois a precipitação na região é considerada uma variável aleatória no espaço.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, A. Q. et al. **Geoestatística no estudo de modelagem temporal da precipitação**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.15, p.354-358, 2011. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000400004>
- ALMEIDA, R. B. **Análise comparativa do uso da estatística clássica e a geoestatística na espacialização da região semi-árida**. 2008. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2008.
- ANA - Agência Nacional das Águas – ANA. **A Questão da Água no Nordeste**. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Brasília, DF: CGEE, 2012. Disponível em: [Biblioteca Digital: A Questão da Água no Nordeste](#). Acesso em: 02 de mar. 2024.
- AVALOS, J. M. M. **Estimación y simulación de la precipitación en Galicia a escala mensual**. 2003. Tese (Doutorado em Biologia), Faculdade de Ciências. Universidade de La Coruña, La Coruña. 264p.
- BACCHI, B.; KOTTEGODA, N. T. **Identification and calibration of spatial correlation patterns of rainfall**. Journal of Hydrology, v. 165, n. 4, p. 311-348, 1995. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)02590-8](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)02590-8)
- CAMARGO, E. C. G. **Geoestatística fundamentos e aplicações**. Geoprocessamento para projetos ambientais. São José dos Campos: INPE 29, 1998. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/gilberto/tutoriais/gis_ambiente/5geoest.pdf. Acessado em: 26/03/2022.

- CAMBARDELLA, C.A. et al. **Fieldscale variability of soil properties in Central Iowa soils**. Soil Science Society of America Journal, v.58, p.1501-1511, 1994. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>
- CARVALHO, O.; EGLER, C. A. G. **Alternativas de desenvolvimento para o nordeste semi-árido**. Ministério da Fazenda: Banco do Nordeste do Brasil. Fortaleza, 2003.
- CBHSF- Comitê da Bacia Hidrográfica do São Francisco. **A Bacia**. Secretaria do Comitê, Agência Peixe Vivo. Belo Horizonte. Disponível em: <https://cbhsaofrancisco.org.br/a-bacia/>. Acessado em: 14 de Agosto de 2023.
- GUIMARÃES, E. C. **Geoestatística básica e aplicada**. 2004. 78f. Núcleo de Estudos Estatísticos e Biométricos. Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, Uberlândia. Disponível em: <https://www.doccity.com/pt/geoestatistica-basica-e-aplicada/4739337/> Acesso em: 2023.
- GUIMARÃES, V. L.; ALVES, R. C. **Comparação de modelos geoestatísticos para estimativa de precipitação em Minas Gerais, Brasil, entre os anos hidrológicos de 2000 e 2021**. Revista Brasileira de Geografia Física, 16(01), 528-541, 2023. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.1.p528-541>
- HOLAWE, F.; DUTTER, R. **Geostatistical study of precipitation series in Austria: time and space**. Journal of Hydrology. v. 219, n. 1, p. 70-82(13), June 1999. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00046-3](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00046-3)
- HUIJBREGTS, C. J. **Regionalized variables and quantitative analysis of spatial data**. In: Davis, J. C.; McCullagh, M. J. (eds.) Display and analysis of spatial data. New York: John Wiley & Sons, 1975. p. 38-53.
- LAMPARELLI, R.A.C.; ROCHA, J.V.; BORGHI, E. **Geoprocessamento e agricultura de precisão: fundamentos e aplicações**. Guaíba: Agropecuária, 2001. 118p.
- MIRANDA, J. G. V. et al. **Temporal and spatial persistence in rainfall records from Northeast Brazil and Galicia (Spain)**. Theory Application Climatology, v 77, n. 1, p. 113-121, 2004. <http://dx.doi.org/10.1007/s00704-003-0013-8>
- PRUSKI, F. F. et al. **Comportamento hidrológico na foz do rio São Francisco durante período de 1950 a 1999**. Revista Engenharia na Agricultura. Viçosa: Associação dos Engenheiros Agrícolas de Minas Gerais, v.13, n.2, 118-123, 2005. Trimestral. ISSN 1414-3984.
- RODRIGUES, A. A. e SILANS, A. M. B. P. **Metodologia para otimização de rede de monitoramento pluviométrico baseada na geoestatística**. XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 202. Anais em CD-ROM, 2001.
- RODRIGUES, B.D, et al. **Uma análise sobre as chuvas no Ceará baseada nos eventos de El Niño, La Niña e no Dipolo de Servain durante a estação chuvosa**. Revista Brasileira de Climatologia [Online] 28, 2021. Disponível: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/76238/43620>. Acesso: 04 out. 2024. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v28i0.76238>
- SILVA, V. D. P. R. D. PEREIRA, E. R. R.; ALMEIDA, R. S. R. **Estudo da variabilidade anual e intra-anual da precipitação na região nordeste do Brasil**. Revista Brasileira de Meteorologia, 27, 163-172, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862012000200005>
- TRANGMAR, B.B.; YOST, R.S.; WADE, M.K.; UEHARA, G. **Applications of geostatistics to spatial studies of soil properties**. Advances in Agronomy, v.38, p.45-94, 1985. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60673-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60673-2)
- TUCCI, C.E.M. **Regionalização de vazões**. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS, 2017.
- VIEIRA, S. **Uso da geoestatística em estudos de variabilidade espacial**. In: **Curso de atualização em conservação do solo**. Campinas, IAC, 61 p. 199, 1995.

Recebido em: 13/07/2024

Aceito para publicação em: 30/10/2024