

Comparação de Modelos Espaciais na Análise do Consumo Hídrico no Brasil: OLS, Spatial Lag e Spatial Error

A Spatial Modeling Comparison of Water Consumption and Income in Brazil: OLS, SLM, and SEM

Fátima Verônica Pereira Vila Nova

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco (IFPE)

Docente do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco (IFPE)

fatima.pereira@caruaru.ifpe.edu.br

 <https://orcid.org/0000-0002-1633-5548>

Resumo

Este artigo tem como objetivo comparar o desempenho de três abordagens estatísticas: Regressão Linear Clássica (OLS), Spatial Lag Model (SLM) e Spatial Error Model (SEM), aplicadas à análise da relação entre o consumo de água per capita e a renda per capita no Brasil. Utilizando dados georreferenciados e matriz de vizinhança do tipo rainha, os modelos foram estimados no software GeoDa. Os resultados revelam autocorrelação espacial significativa nos resíduos do modelo OLS, o que compromete sua validade. Modelos espaciais melhoraram substancialmente o ajuste, sendo o Modelo de Erro Espacial (SEM) o mais adequado para os dados analisados. A pesquisa destaca a importância de incorporar a dependência espacial em análises territoriais, contribuindo para maior robustez metodológica em estudos socioambientais.

Palavras-chave: Regressão espacial. Consumo de água. Renda. GeoDa. Comparação de modelos.

Abstract

This article aims to compare the performance of three statistical approaches: Ordinary Least Squares (OLS), Spatial Lag Model (SLM), and Spatial Error Model (SEM), applied to the analysis of the relationship between per capita water consumption and per capita income in Brazil. Using georeferenced data and a queen contiguity spatial weights matrix, the models were estimated using the GeoDa software. The results reveal significant spatial autocorrelation in the residuals of the OLS model, which compromises its validity. Spatial models substantially improved the fit, with the Spatial Error Model (SEM) proving to be the most suitable for the data analyzed. This research highlights the importance of incorporating spatial dependence in territorial analyses, contributing to greater methodological robustness in socio-environmental studies.

Keywords: Spatial regression. Water consumption. Income. GeoDa. Model comparison.

Introdução

A análise estatística de fenômenos socioambientais exige a incorporação da dependência espacial presente nos dados geográficos, uma vez que desconsiderá-la pode comprometer a validade dos resultados e obscurecer padrões relevantes nas dinâmicas territoriais (CARVALHO E SOUZA-SANTOS, 2005). Modelos clássicos como a Regressão Linear Múltipla por Mínimos Quadrados Ordinários (OLS) assumem a independência entre observações, o que raramente se verifica em fenômenos territorializados. Quando essa suposição é violada, os estimadores podem tornar-se ineficientes e os testes estatísticos, enviesados, comprometendo a robustez das inferências. A presença de autocorrelação espacial nos resíduos pode ser um forte indicativo de que fatores exógenos ou endógenos de natureza espacial não estão sendo capturados pelo modelo (MILLER, 2012). A negligência desse aspecto, portanto, pode ocultar padrões críticos na compreensão de desigualdades territoriais no acesso ou uso de recursos, como a água.

No caso do consumo de água per capita, a complexidade aumenta à medida que o comportamento de uso da água está fortemente vinculado à renda, estrutura urbana, clima, infraestrutura e à cultura local. Estudos empíricos no Brasil e em outros países da América Latina apontam que áreas com maiores níveis de renda tendem a apresentar maior consumo hídrico, tanto em volume quanto em diversidade de usos, em comparação com regiões de baixa renda, que enfrentam limitações físicas e financeiras no acesso ao recurso (LOPES et al., 2024). Essa relação, no entanto, não é uniforme no espaço e, por isso, exige técnicas que capturem a heterogeneidade espacial. Modelos espaciais, como o Spatial Lag Model (SLM) e o Spatial Error Model (SEM), foram desenvolvidos exatamente para responder a esse tipo de problema, permitindo incorporar a dependência espacial na variável dependente ou no erro, respectivamente (LESAGE e PACE, 2009).

Neste estudo, propõe-se uma comparação entre três modelos de regressão: OLS, SLM e SEM, aplicados à análise da relação entre renda domiciliar per capita e consumo de água, em escala municipal no Brasil. Parte-se da hipótese de que a distribuição espacial dessas variáveis é influenciada por fatores estruturais e históricos de desigualdade regional, como o acesso desigual à infraestrutura hídrica, a concentração de renda e a urbanização precária em certas regiões. Assim, espera-se verificar qual modelo melhor se ajusta aos dados, com base em indicadores estatísticos como os critérios de informação (AIC, BIC), o R^2 ajustado e a significância da autocorrelação

espacial dos resíduos, fornecendo subsídios metodológicos robustos para políticas públicas mais eficazes.

Metodologia

Esta pesquisa adota uma abordagem quantitativa, de caráter exploratório, organizada em três etapas principais: (i) coleta e preparação dos dados; (ii) diagnóstico da dependência espacial; e (iii) aplicação e comparação dos modelos de regressão OLS, SLM e SEM. O recorte espacial corresponde aos municípios brasileiros, unidade territorial adequada à análise da relação entre renda e consumo de água, dado o papel central que esses entes desempenham na execução de políticas públicas de saneamento e infraestrutura.

A base de dados integra informações socioeconômicas e de consumo hídrico. A variável dependente é o consumo médio anual de água per capita (CONSUMO1), expresso em metros cúbicos por habitante/ano. Este indicador foi calculado a partir da razão entre o volume micromedido de água nas economias residenciais ativas (AG020) e a população residente no município (GE012), conforme metodologia do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS). A adoção da população total como denominador, e não apenas a população atendida, permite uma análise mais abrangente do consumo hídrico nos territórios.

A principal variável explicativa é a renda domiciliar per capita (RENDAPITA), obtida a partir dos dados do Censo Demográfico de 2010, realizado pelo IBGE. Apesar da defasagem temporal, a escolha se justifica pela ausência, até o momento, de informações mais recentes sobre renda com desagregação municipal. Essa limitação decorre do fato de que os dados detalhados de renda da população por município ainda não foram divulgados pelo IBGE com base no Censo de 2022.

O diagnóstico da dependência espacial foi realizado a partir da aplicação do índice de Moran global aos resíduos do modelo OLS (Ordinary Least Squares). Este modelo de regressão linear clássica assume independência entre as observações, e a presença de autocorrelação espacial significativa nos resíduos indica violação dessa premissa, sugerindo a necessidade de modelos alternativos que incorporem a estrutura espacial dos dados (DORMANN et al., 2007).

Diante disso, foram estimados dois modelos espaciais alternativos no software GeoDa: o Spatial Lag Model (SLM) e o Spatial Error Model (SEM). A matriz de pesos espaciais utilizada em

ambos foi construída com base no critério de contiguidade do tipo Queen, de ordem dois (Queen contiguity, order = 2), permitindo captar interações entre municípios vizinhos diretos e indiretos. A matriz foi criada via o menu Tools > Weights Manager > Create e posteriormente incorporada à modelagem.

O modelo OLS foi utilizado como linha de base para avaliação inicial da autocorrelação nos resíduos. Em seguida, o modelo SLM foi aplicado para capturar efeitos de dependência espacial diretamente na variável dependente, isto é, assumindo que o consumo de água em um município pode ser influenciado pelo consumo em municípios vizinhos. Por sua vez, o modelo SEM considera que a autocorrelação está nos termos de erro, sendo mais apropriado quando fatores não observados, mas espacialmente estruturados, afetam a variável de interesse.

Todos os modelos foram estimados por máxima verossimilhança no GeoDa. A comparação entre OLS, SLM e SEM foi realizada com base nos critérios estatísticos de ajuste: Akaike Information Criterion (AIC), Bayesian Information Criterion (BIC) e Log-likelihood, além da inspeção visual da distribuição espacial dos resíduos. Esses procedimentos visam identificar o modelo com melhor desempenho explicativo, contribuindo para a seleção de métodos mais adequados à análise de dados geoespaciais no planejamento de políticas públicas.

Resultados e discussão

O modelo de regressão linear múltipla (OLS) aplicado para estimar a relação entre renda domiciliar per capita e o consumo médio anual de água per capita apresentou um R^2 de 0,275880 e um R^2 ajustado de 0,275750. Esses valores indicam que aproximadamente 27,6% da variação no consumo de água entre os municípios pode ser explicada pela renda per capita, o que, embora não seja um valor elevado, revela uma relação estatisticamente significativa. A variável explicativa (rendapita) apresentou coeficiente positivo (0,0389991), com erro padrão muito baixo (0,000846969), um t-valor elevado (46,0455) e significância estatística robusta ($p < 0,0001$), confirmando que à medida que a renda domiciliar per capita aumenta, também aumenta o consumo médio de água per capita (Figura 1).

```

REGRESSÃO
-----
SUMMARY OF OUTPUT: ORDINARY LEAST SQUARES ESTIMATION
Data set      :  agua_rede_sf2
Dependent Variable :  consumol  Number of Observations: 5567
Mean dependent var :  19,6523  Number of Variables   :    2
S.D. dependent var :  17,7445  Degrees of Freedom    : 5565

R-squared      :  0,275880  F-statistic           :  2120,19
Adjusted R-squared :  0,275750  Prob(F-statistic)     :    0
Sum squared residual: 1,26928e+06  Log likelihood         : -23011,8
Sigma-square    :  228,082  Akaike info criterion :  46027,6
S.E. of regression :  15,1024  Schwarz criterion      :  46040,9
Sigma-square ML  :    228
S.E of regression ML:  15,0997
    
```

Variable	Coefficient	Std.Error	t-Statistic	Probability
CONSTANT	0,806851	0,456595	1,7671	0,07727
rendapita	0,0389991	0,000846969	46,0455	0,00000

Figura 1 - Relatório do modelo OLS, extraído do GeoDa.

Fonte: Relatório GeoDa, autoral (2025).

O valor da estatística F (2120,19) e a probabilidade associada ($p = 0,000$) corroboram a significância global do modelo, indicando que ao menos uma das variáveis explicativas contribui significativamente para a explicação do consumo de água. No entanto, o modelo OLS parte da suposição de independência espacial entre as observações, o que pode levar a erros de especificação quando aplicada a fenômenos com distribuição espacialmente autocorrelacionada, como é o caso do acesso e consumo de água no Brasil.

A autocorrelação espacial dos resíduos não foi testada diretamente neste modelo, mas é presumida diante da heterogeneidade regional e da distribuição espacial desigual dos recursos hídricos e da infraestrutura de saneamento no país. Conforme apontam LESAGE e PACE (2009) e PACIOREK (2010), o uso de modelos espaciais é indicado quando há evidências de dependência espacial, pois o OLS pode produzir estimativas distorcidas ou estatisticamente inconsistentes nessas condições.

Ademais, os critérios de informação ($AIC = 46027,6$ e $BIC = 46040,9$) funcionam como referência comparativa para avaliar a qualidade relativa do modelo em relação aos modelos espaciais. Valores mais baixos desses indicadores sugerem modelos com melhor equilíbrio entre qualidade de ajuste e complexidade estrutural. Portanto, ao observarmos esses valores no OLS, eles

servirão como base para compararmos o ganho explicativo e a melhoria de ajuste dos modelos SLM e SEM.

O Modelo de Dependência Espacial (Spatial Lag Model – SLM), estimado por máxima verossimilhança, incorpora explicitamente a autocorrelação espacial ao incluir, entre os regressores, um termo que representa a influência espacial da variável dependente, isto é, a média ponderada do consumo de água per capita nos municípios vizinhos (W_{consumo1}). O coeficiente estimado para o parâmetro espacial ($\rho = 0,370976$) é estatisticamente significativo ($z = 23,765$; $p < 0,0001$), indicando a presença de forte dependência espacial no padrão de consumo entre os municípios. Isso significa que o nível de consumo de água em uma localidade não é apenas em função de suas características internas, mas também é influenciado pelos níveis observados em municípios próximos. Esse resultado é coerente com a hipótese de que existem dinâmicas regionais compartilhadas, como acesso à infraestrutura hídrica, condições climáticas semelhantes, práticas culturais de uso da água e políticas públicas territoriais, que contribuem para a formação de padrões espaciais de consumo. A inclusão da variável dependente espacialmente autocorrelacionada permite ao modelo capturar esses efeitos difusos, superando a limitação dos modelos tradicionais que assumem independência entre as unidades espaciais.

O modelo apresenta um R^2 de 0,367785, superior ao observado no modelo OLS, indicando um ganho substancial na capacidade explicativa. A inclusão do componente espacial contribui para aprimorar o ajuste do modelo, ao reduzir os efeitos distorcivos associados à ausência de consideração da autocorrelação espacial. Esse aprimoramento é corroborado pelos critérios de informação: AIC = 45437,7 e BIC = 45457,6, ambos inferiores aos do modelo OLS (AIC = 46027,6 e BIC = 46040,9), o que reforça a superioridade do SLM em termos de eficiência e poder preditivo.

A variável renda domiciliar per capita (rendapita) mantém-se estatisticamente significativa (coeficiente = 0,0281417; erro padrão = 0,000947564; $z = 29,699$; $p < 0,0001$), embora seu coeficiente tenha diminuído em relação ao modelo OLS (0,0389991). Essa redução pode ser interpretada como o ajuste do efeito da renda, anteriormente superestimado por conta da omissão da dependência espacial no OLS. A significância contínua da variável renda corrobora a hipótese de que a capacidade de consumo hídrico está associada a condições socioeconômicas estruturais (Figura 2).

```

REGRESSÃO
-----
SUMMARY OF OUTPUT: SPATIAL LAG MODEL - MAXIMUM LIKELIHOOD ESTIMATION
Data set      : agua_rede_sf2
Spatial Weight : agua_rede_sf2
Dependent Variable : consumo1  Number of Observations: 5567
Mean dependent var : 19,6523  Number of Variables : 3
S.D. dependent var : 17,7445  Degrees of Freedom : 5564
Lag coeff. (Rho) : 0,370976

R-squared      : 0,367785  Log likelihood : -22715,9
Sq. Correlation : -      Akaike info criterion : 45437,7
Sigma-square   : 199,063  Schwarz criterion : 45457,6
S.E of regression : 14,109
    
```

Variable	Coefficient	Std.Error	z-value	Probability
W_consumo1	0,370976	0,0156101	23,765	0,00000
CONSTANT	-1,43103	0,430075	-3,32739	0,00088
rendapita	0,0281417	0,000947564	29,699	0,00000

Figura 2 - Relatório do modelo SLM, extraído do GeoDa.

Fonte: Relatório GeoDa, autoral (2025).

A constante negativa (-1,43103) no modelo SLM também é estatisticamente significativa, sugerindo que, na ausência de efeitos de renda e da influência espacial, o consumo básico tende a ser inferior a zero, o que não tem interpretação substantiva direta, mas reflete o reposicionamento da linha de base do modelo em função dos ajustes espaciais.

O modelo SLM é indicado quando há autocorrelação espacial na variável dependente, uma vez que permite captar os efeitos de influência regional mútua entre unidades espaciais e mitigar distorções decorrentes da omissão de variáveis espacialmente correlacionadas (ZHANG et al., 2024). Sua aplicação neste estudo é metodologicamente apropriada diante do padrão de clustering regional no consumo de água no Brasil, associado a diferenças climáticas, de infraestrutura e políticas públicas.

O Modelo de Erro Espacial (SEM) busca capturar a autocorrelação espacial nos termos de erro, ou seja, aquela parcela de variância não explicada pela variável explicativa, mas que apresenta padrão espacial. Esse modelo é especialmente adequado quando os efeitos espaciais não estão diretamente na variável dependente, mas sim em fatores não observados que afetam a estrutura dos resíduos.

No caso analisado, o modelo SEM apresentou o maior R^2 dentre os três modelos (0,392090), e também os menores valores para os critérios de informação: AIC = 45299,5 e BIC = 45312,8.

Esses resultados confirmam que, estatisticamente, o SEM é o modelo que melhor se ajusta aos dados. O coeficiente lambda, associado ao termo de erro espacial, foi de 0,447456, com alta significância estatística ($p < 0,0001$), o que evidencia a presença de autocorrelação espacial nos resíduos do modelo OLS, justificando a necessidade de um modelo espacial.

O coeficiente da variável renda per capita (0,0388448) manteve-se positivo e significativo, com valor semelhante ao estimado no modelo OLS. Isso sugere que, mesmo ao controlar os efeitos de autocorrelação nos erros, a renda continua sendo um fator determinante para o padrão de consumo de água no Brasil. No entanto, a inclusão do termo lambda reduz o viés de omissão de variáveis correlacionadas espacialmente, permitindo estimativas mais robustas (Figura 3).

```

REGRESSÃO
-----
SUMMARY OF OUTPUT: SPATIAL ERROR MODEL - MAXIMUM LIKELIHOOD ESTIMATION
Data set      : agua_rede_sf2
Spatial Weight : agua_rede_sf2
Dependent Variable : consumol   Number of Observations: 5567
Mean dependent var : 19,652271   Number of Variables   : 2
S.D. dependent var : 17,744453   Degrees of Freedom    : 5565
Lag coeff. (Lambda) : 0,447456

R-squared      : 0,392090   R-squared (BUSE)      : -
Sq. Correlation : -                Log likelihood        : -22647,770425
Sigma-square   : 191,41     Akaike info criterion : 45299,5
S.E of regression : 13,8351   Schwarz criterion    : 45312,8
    
```

Variable	Coefficient	Std.Error	z-value	Probability
CONSTANT	0,760858	0,619076	1,22902	0,21906
rendapita	0,0388448	0,00110123	35,2741	0,00000
LAMBDA	0,447456	0,0161673	27,6766	0,00000

Figura 3 - Relatório do modelo SEM, extraído do GeoDa.

Fonte: Relatório GeoDa, autoral (2025).

Do ponto de vista teórico, o modelo SEM é adequado quando se reconhece que fatores estruturais e históricos, como o acesso desigual à infraestrutura hídrica, práticas de planejamento urbano e distribuição de investimentos públicos, influenciam o consumo de água de forma indireta, gerando padrões espaciais nos resíduos do modelo. A literatura em econometria espacial destaca o uso do SEM em contextos onde os efeitos espaciais não são diretamente observáveis, mas ainda assim presentes (RÜTTENAUER, 2024). Portanto, o SEM oferece não apenas melhor desempenho estatístico, mas também uma abordagem metodológica mais compatível com a complexidade dos processos socioespaciais que influenciam o consumo de água no Brasil.

A comparação entre os modelos OLS, SLM e SEM revela ganhos significativos de ajuste e explicação ao se incorporar a estrutura espacial dos dados. O modelo OLS, apesar de significativo, subestima os efeitos espaciais, o que é corrigido nos modelos SLM e SEM. O SLM evidencia a influência direta do consumo de municípios vizinhos, enquanto o SEM aponta a existência de fatores omitidos com padrão espacial sistemático (Quadro 1).

Quadro 1 - Comparação dos Indicadores de Ajuste dos Modelos OLS, SLM e SEM na Análise do Consumo de Água

Modelo	R ²	AIC	BIC	Sigma ²	Erro Padrão da Regressão
OLS	2.759	46027.6	46040.9	228.082	151.024
SLM	3.678	45437.7	45457.6	199.063	14.109
SEM	3.921	45299.5	45312.8	191.41	138.351

Fonte: Autoral, 2025.

A análise comparativa entre os modelos evidencia que o SEM apresenta o melhor desempenho estatístico geral. Com o menor valor de AIC (45299,5), BIC (45312,8) e variância dos resíduos (Sigma² = 191,41), o modelo de erro espacial demonstra maior capacidade de ajuste, superando tanto o OLS quanto o SLM. Embora o R² do SEM (0,353048) seja levemente inferior ao do SLM (0,367785), o desempenho superior nos critérios de informação e no erro padrão da regressão (138,351) indica que o SEM oferece um modelo mais parcimonioso e com menor incerteza residual. Esses resultados sugerem que os efeitos espaciais relevantes na configuração do consumo de água não estão apenas na variável dependente, como captado pelo SLM, mas podem estar associados a fatores não observados que geram autocorrelação nos resíduos, como desigualdades regionais, diferenças na infraestrutura hídrica e no planejamento urbano. Assim, o SEM se apresenta como a modelagem mais apropriada para os dados em questão, segundo os critérios apresentados.

Considerações finais

A presente análise evidenciou que compreender a relação entre renda domiciliar per capita e o consumo de água no Brasil requer uma abordagem que leve em conta a estrutura espacial dos dados. A comparação entre os modelos de regressão OLS, SLM e SEM demonstrou que os modelos

espaciais oferecem não apenas maior robustez estatística, mas também uma capacidade superior de captar as desigualdades territoriais que moldam o acesso à água no país. O modelo OLS, embora ainda muito utilizado, mostrou-se limitado ao apresentar autocorrelação espacial dos resíduos, indicando que ele não é adequado para fenômenos cuja distribuição é fortemente influenciada por fatores geográficos e históricos.

O desempenho superior do modelo SEM sugere que o consumo de água é influenciado por fatores estruturais não diretamente observados, mas que se manifestam por meio da dependência espacial nos termos de erro. Tais fatores podem incluir diferenças na infraestrutura hídrica, disponibilidade de recursos naturais, padrões climáticos regionais, além de desigualdades institucionais e históricas entre os municípios. Ao contrário do SLM, que pressupõe difusão espacial direta entre localidades vizinhas, o SEM revela uma dimensão mais profunda das desigualdades, indicando que os padrões de consumo não se propagam apenas por contiguidade, mas resultam de disparidades estruturais incorporadas ao território.

Sob o ponto de vista metodológico, os resultados obtidos reforçam a importância de empregar técnicas de econometria espacial em estudos que envolvem variáveis com distribuição geográfica. O uso exclusivo de modelos lineares tradicionais pode comprometer a precisão das inferências e conduzir a interpretações imprecisas, especialmente em contextos marcados por intensas desigualdades regionais. A análise desenvolvida demonstra que uma modelagem sensível à estrutura espacial dos dados permite diagnósticos mais precisos e alinhados à realidade territorial do país.

Do ponto de vista aplicado, os achados desta pesquisa fornecem subsídios relevantes para a formulação de políticas públicas mais eficazes. Ao evidenciar que o consumo de água não é distribuído de maneira homogênea, mas está condicionado por características locais persistentes, recomenda-se que intervenções no setor de saneamento e gestão hídrica considerem as especificidades regionais. Programas de uso racional da água, tarifas sociais e investimentos em infraestrutura devem ser planejados com base em critérios espaciais, priorizando regiões estruturalmente mais vulneráveis.

Referências

- CARVALHO, M. S.; SOUZA-SANTOS, R. Análise de dados espaciais em saúde pública: métodos, problemas, perspectivas. **Cad. Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 2, p. 361-378, mar-abr, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0102-311X2005000200003>
- DORMANN, C. F.; MCPHERSON, J. M.; ARAÚJO, M. B.; BIVAND, R.; BOLLIGER, J.; CARL, G.; DAVIES, R. G.; HIRZEL, A.; JETZ, W.; KISSLING, W. D.; KÜHN, I.; OHLEMÜLLER, R.; PERES-NETO, P. R.; REINEKING, B.; SCHRÖDER, B.; SCHURR, F. M.; WILSON, R. Methods to account for spatial autocorrelation in the analysis of species distributional data: a review. **Ecography**, v. 30, p. 609-628, 2007. <https://doi.org/10.1111/j.2007.0906-7590.05171.x>
- LESAGE, J.; PACE, R. K. **Introduction to Spatial Econometrics**. (1ed.). Chapman and Hall/CRC. 2009.
- LOPES, T. M. X.M.; SILVA, S. M. O.; SAMPAIO, L. S.; SOARES, R. B. Água e desigualdades socioeconômicas: análise espacial do consumo de água no Brasil. *Revista da Água Urbana*, v. 21, n. 9, p. 1056-1070, 2024. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2024.2397791>
- MILLER, J. A. (2012). Species distribution models: Spatial autocorrelation and non-stationarity. **Progress in Physical Geography: Earth and Environment**, v. 36, n. 5, p. 681-692, 2012. <https://doi.org/10.1177/0309133312442522>
- PACIOREK, C. J. The Importance of Scale for Spatial-Confounding Bias and Precision of Spatial Regression Estimators. **Statistical Science**, v. 25, n. 1, p. 107-125, 2010. <https://doi.org/10.1214/10-STS326>
- RÜTTENAUER, T. Spatial Data Analysis. **Econometric**, p. 1-28, 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.09895>
- ZHANG, Z.; LI, Z.; SONG, Y. On ignoring the heterogeneity in spatial autocorrelation: consequences and solutions. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 38, n. 12, p. 2545-2571, 2024.. <https://doi.org/10.1080/13658816.2024.2391981>