



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Análise exploratória sobre a expansão urbana da sede de Santarém utilizando GWR

Gilberto Eidi Teramoto Oliveira

INPE
São José dos Campos
2021

RESUMO

No último século o processo de urbanização se tornou mundial, ocorrendo de diversas formas no mundo e em diferentes escalas. Mesmo em diferentes regiões de um país processos distintos podem estar presentes para a expansão de áreas urbanas e determinar os vetores de expansão destas. Desta forma, o presente trabalho buscou explorar como certos fenômenos estão relacionados à expansão urbana no município de Santarém (PA). Para isso, foi feita uma revisão da literatura, aplicados métodos estatísticos para verificação das variáveis e aplicado o modelo não estacionário, Geographically Weighted Regression, para a compreensão destas. Por fim, os resultados foram analisados e novas questões para futuros trabalhos foram postas.

Palavras-chave: Expansão Urbana; Análise Espacial; Geographically Weighted Regression.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1. INTRODUÇÃO.....	5
2. ÁREA DE ESTUDO	6
3. MATERIAIS E MÉTODOS	7
4. RESULTADOS	11
5. CONCLUSÕES.....	18
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	19
7. APÊNDICE	21

Lista de Figuras

Figura 1: Área de Estudo.	6
Figura 2: Expansão da área urbana (2004 - 2014) em grade celular.	7
Figura 3: Fluxograma dos procedimentos seguidos.	8
Figura 4: a) R quadrado local da GWR e b) valores do intercepto.	12
Figura 5: Coeficiente de declividade (a) e platô (b) da GWR.	14
Figura 6: coeficientes de (a) distância a áreas urbanas, (b) distância a estradas e (c) população em 2010.	16
Figura 7: coeficientes de (a) áreas com potencial médio para mudança e (b) áreas com potencial baixo para mudança.	17

Lista de Tabelas

Tabela 1: Variáveis selecionadas.....	9
Tabela 2: Coeficientes da GWR.....	11

1. INTRODUÇÃO

O município de Santarém, localizado no estado do Pará, é o terceiro mais populoso do estado com 294.580 habitantes em 2010 e possui uma influência regional, considerada como uma capital regional pelo IBGE (2018). Até o século XIX o município foi marcado principalmente por uma ocupação dispersa, com pequenas ocupações distribuídas ao longo das calhas de rio (GOMES, CARDOSO, 2019). Entretanto, ciclos econômicos e exploração de recursos naturais influenciaram na ascensão do local como um centro comercial da região do baixo amazonas.

Na década de 1970 a sede do município passou a ter uma intensificação de ocupação e dinâmicas econômicas com os projetos de integração da Amazônia e a construção de infraestruturas de transporte. A sede do município passa a ser influenciada por projetos de infraestrutura e as novas dinâmicas de produção agropecuárias. A partir de 2000, a expansão passa a ser influenciada por três eixos viários principais: Rodovia Santarém-Cuiabá (BR-163), Rodovia Estadual Curuá-Una (PA-370) e a avenida em direção ao aeroporto.

Atualmente, a sede de Santarém possui áreas que podem ser consideradas tanto como locais muito adensados, quanto outras áreas com características de expansão urbana (DAL'ASTA et al, 2015). Estudos sobre a expansão das áreas urbanas do município e suas dinâmicas espaciais contribuem para compreender os fatores associados à expansão urbana e seus vetores de crescimento.

Assim, no presente trabalho foram exploradas relações entre variáveis num nível local e a expansão urbana da sede de Santarém entre os anos de 2004 e 2014. Foi aplicado o método Geographic Weighted Regression (GWR) como um método exploratório para observar as relações locais entre as variáveis escolhidas. Portanto, buscou-se explorar como determinados fatores estão espacialmente associados à expansão urbana na sede do município de Santarém. Um levantamento bibliográfico foi realizado para seleção das variáveis, seguido por testes estatísticos para sua seleção e aplicação do modelo GWR. Por fim, os resultados foram avaliados e discutidos.

2. ÁREA DE ESTUDO

O município de Santarém, localizado no estado do Pará, possui uma população estimada de 294.580 habitantes em 2010, sendo o terceiro município mais populoso do estado. Sua área total é de 17.898,389 km² tendo uma influência regional, considerada uma Capital Regional C na hierarquia urbana do IBGE.

A área de estudo foi limitada a áreas ocupadas, utilizando da metodologia de Gonçalves (2021, em preparação) para o ano de 2014. Esta metodologia delimita áreas consideradas de ocupação humana utilizando dados de luzes noturnas do sensor VIIRS (Figura 1).

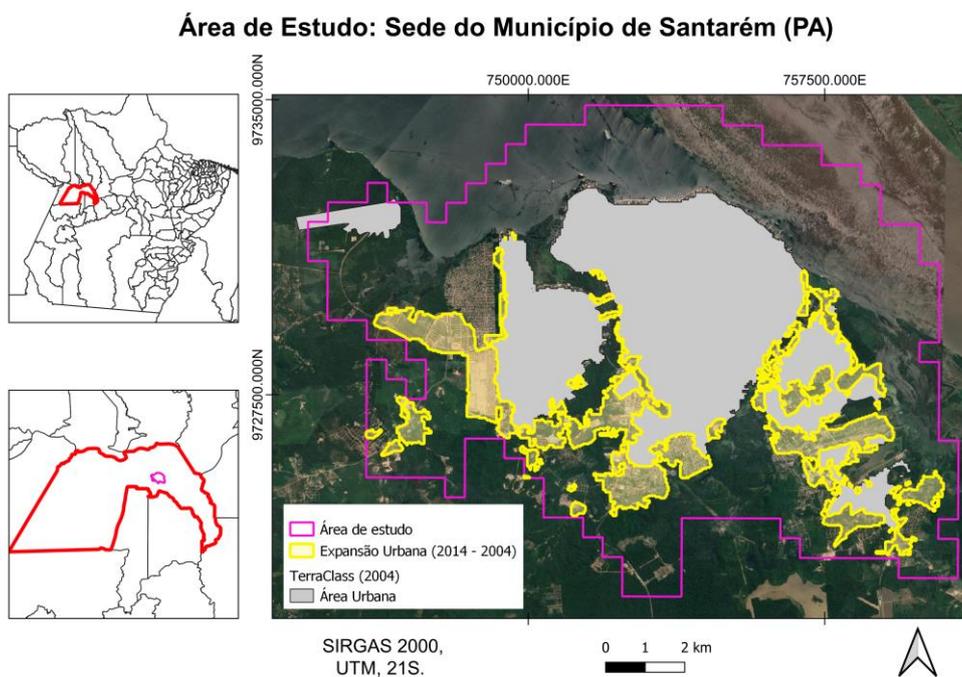


Figura 1: Área de Estudo.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a análise dos dados selecionados, foi utilizado uma grade celular para área de estudo seguindo o modelo de Zhang et al (2017). Nesta metodologia, não são consideradas as áreas de corpos hídricos e já urbanizadas. Para identificar a área de expansão urbana, foi feita uma álgebra de mapas, onde o foi subtraída a área urbana de 2004 da área urbana de 2014 do dado do Terra Class (ALMEIDA ET AL, 2016).

O uso da grade se deu, pois, esta favorece a integração de dados de diversas origens e a sua análise (D'ANTONA, BUENO; 2013). Assim, a grade criada possui uma resolução de 250 metros na horizontal e vertical. O tamanho foi escolhido por meio de revisões bibliográficas sobre a área de estudo e por testes empíricos, onde foi escolhida a de melhor ajuste para aplicação da GWR(Figura 2).

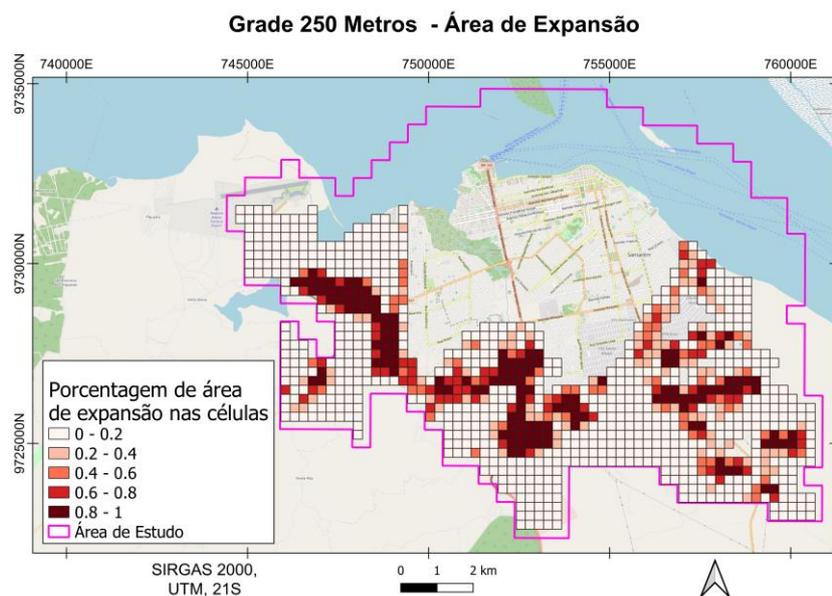


Figura 2: Expansão da área urbana (2004 - 2014) em grade celular.

A GWR é uma técnica utilizada para modelar processos não estacionários, ou seja, processos que variam de acordo com o espaço e não são distribuídos de maneira aleatória. Essa constatação pode ser feita ao aplicar análises de segunda ordem, onde é constatada agrupamento das áreas de expansão (Apêndice). O modelo GWR realiza regressões locais para determinada área. Sua fórmula é descrita por:

$$y = \beta_0(u) + \beta_1x_1(u) + \beta_2x_2(u) + \varepsilon(u)$$

Onde o $\beta_0(u)$ é o intercepto da regressão localizada, sendo o espaço representado por u . Os β_1 e β_2 são os coeficientes estimados das variáveis explicativas x_1 e x_2 para cada localidade e o $\varepsilon(u)$ os erros estimados localmente. No presente trabalho, essa área da regressão, ou “*bandwidth*”, foi escolhida no programa *GWR4* por meio de um kernel adaptativo gaussiano, utilizando o método *Golden Section*, selecionando a que obteve melhor valor de Akaike.

Para a aplicação da GWR foi realizado uma série de procedimentos, a fim de identificar quais dados selecionados seriam analisados e quais transformações seriam necessárias. Os procedimentos seguidos estão presentes no fluxograma (figura 3):

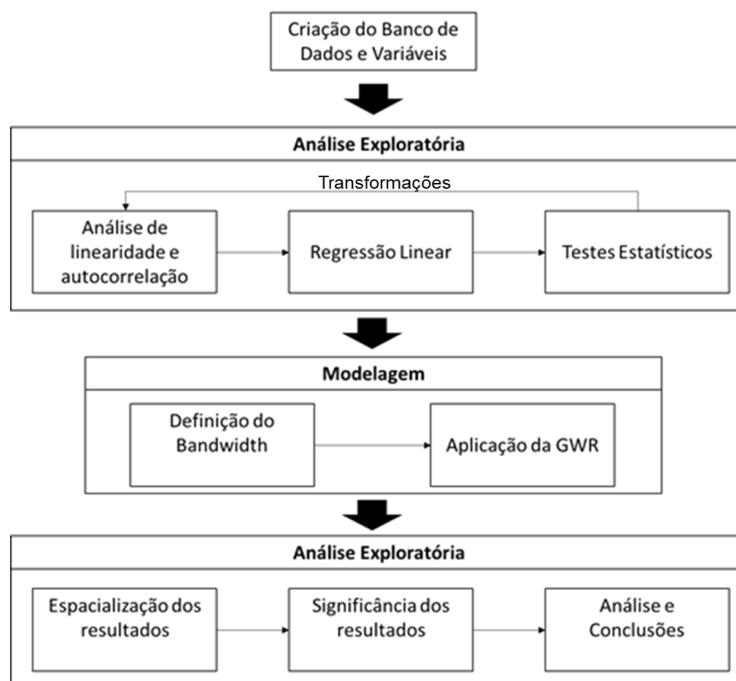


Figura 3: Fluxograma dos procedimentos seguidos.

Assim, a partir de uma revisão bibliográfica, foi criado um banco de dados com diferentes fatores que foram considerados como associados à expansão urbana. Os fatores envolvem características de físicas do terreno e questões antrópicas. Das características físicas foram utilizadas a declividade média presente na célula a partir do Topo Data (BRASIL, 2008) e a área de determinados tipos de

terreno classificados por Pinheiro, Rennó e Escada (2015). Dos fatores antrópicos, foram utilizados a quantidade de pessoas por célula em 2010 (IBGE 2016), a distância às estradas (UFMG - CSR), distância a áreas urbana anterior e uso e cobertura da terra identificadas como potenciais econômicos de mudanças (RAMOS, 2014) (Tabela 1).

Variável	Justificativa
Resposta: Expansão Urbana	Terra Class 2004 e 2014.
Explicativas (Físicas):	
Declividade Média do TopoData (Brasil, 2008)	Tipos de terreno como condicionante físico de ocupação (GOMES ET AL, 2017, p 14)
Classificação de terreno: <u>Baixio</u> -> planícies aluviais ao longo dos igarapés, onde se encontram os solos predominantemente úmidos; <u>Baixio-Vertente</u> -> áreas úmidas e de transição entre baixio e as vertentes; <u>Vertente</u> -> áreas íngremes e de transição entre platôs e baixios; <u>Plato</u> -> áreas mais altas, com lençol freático profundo e solos predominantemente secos	Tipos de terreno como condicionante físico de ocupação. Atualmente a expansão se dá de maneira diferenciada, com habitações precárias próximas à áreas alagáveis enquanto a cidade formal segue outras áreas (GOMES ET AL, 2017, p 14)
Explicativas (Antrópicas):	
População (2010)	Novas áreas urbanas com menores populações (OLIVEIRA, 2008)
Distância à Estradas	Novos vetores de ocupação do território: próximo a quatro estradas principais (CARDOSO, 2019, p14)
Distância à área urbana anterior (2004)	Crescimento urbano se dava tanto próximo quanto distante da área urbana entre 2000 e 2010 (RAMOS, 2014)
Uso e cobertura anterior (2004): <u>Baixo Potencial</u> -> pasto limpo; <u>Médio Potencial</u> -> mosaico de ocupações, e pasto sujo; <u>Alto Potencial</u> -> regeneração com pasto e vegetação secundária; <u>Floresta</u> (possível reserva de terra)	Principais classes de uso e cobertura do solo com potenciais econômicos de mudança de acordo com modelos de economia urbana (RAMOS, 2014)

Tabela 1: Variáveis selecionadas.

Após criado o banco de dados, foi feita uma análise exploratória onde foram testadas a linearidade entre as variáveis explicativas e a resposta; presença de multicolinearidade das variáveis explicativas; seleção das variáveis para o modelo de regressão pela abordagem stepwise (backward e forward) como método de seleção dos previsores; e testes estatísticos de multicolinearidade das variáveis selecionadas e testes de normalidade dos resíduos. Posteriormente foi definida a largura da banda utilizando um kernel adaptativo gaussiano e utilizando a seleção Golden Section. Os procedimentos foram realizados nos softwares: *TerraView 5.6.1*, *QGIS 3.18*, *RStudio 4.1.1.1* e *GWR4*.

4. RESULTADOS

As variáveis explicativas selecionadas para o modelo foram: declividade média; platô; distância a estradas; distância a áreas urbanas; classes potenciais de mudança de uso do solo médio e baixo; população residente em 2010. Aplicando os testes estatísticos de normalidade (Teste de Jarque-Bera) foi identificado que a regressão não possui uma distribuição normal (Apêndice).

Problemas podem ocorrer caso não exista a normalidade na distribuição dos resíduos. Assim, foi realizado uma transformação Box Cox seguindo os procedimentos de (YU ET AL, 2013) para a variável dependente, sendo identificado o valor de 0.05 a ser aplicado. Após a transformação o modelo passa no teste de normalidade dos resíduos, apresentando uma distribuição normal numa significância de 0.001 (Apêndice).

A GWR foi aplicada utilizando o kernel com melhor valor estimado, este que foi o de 50 vizinhos. O primeiro resultado possível de verificar são os valores gerais dos dados utilizados (tabela 2). Neles são apontados que todos os coeficientes, exceto o intercepto, possuem valores negativos e positivos. Entretanto, existem valores não significativos que devem ser retirados para compreender os valores dos coeficientes.

Estatísticas dos Coeficientes Locais					
Variable	Mean	STD	Min.	Max.	Range
Intercepto	0.917519	0.083126	0.763772	1.041000	0.277228
Declividade	-0.000147	0.000062	-0.000298	0.000040	0.000338
Plato	-0.005688	0.007495	-0.026000	0.027019	0.053019
Dist. Estradas	0.195790	0.127065	-0.604535	0.383789	0.988323
Dist. área urbana	0.239071	0.104513	-0.068919	0.447569	0.516487
Uso e Cob. do Solo Pot. Médio	0.024731	0.047498	-0.081192	0.157377	0.238569
Uso e Cob. do Solo Pot. Baixo	0.000394	0.000656	-0.000576	0.004005	0.004580
População em 2010	-0.000107	0.000071	-0.000275	0.000070	0.000345

Tabela 2: Coeficientes da GWR.

Observando o R quadrado local (figura 4a), é visto que maiores valores são encontrados no sul da área de estudo que é um dos vetores de crescimento urbano da sede do município, próximo à rodovia BR101. Esses valores demonstram que o modelo explica mais nestes locais se comparado ao restante da área de estudo. Já os valores superiores do intercepto (figura 4b) estão presentes na parte oeste da área de estudo, próximo ao aeroporto.

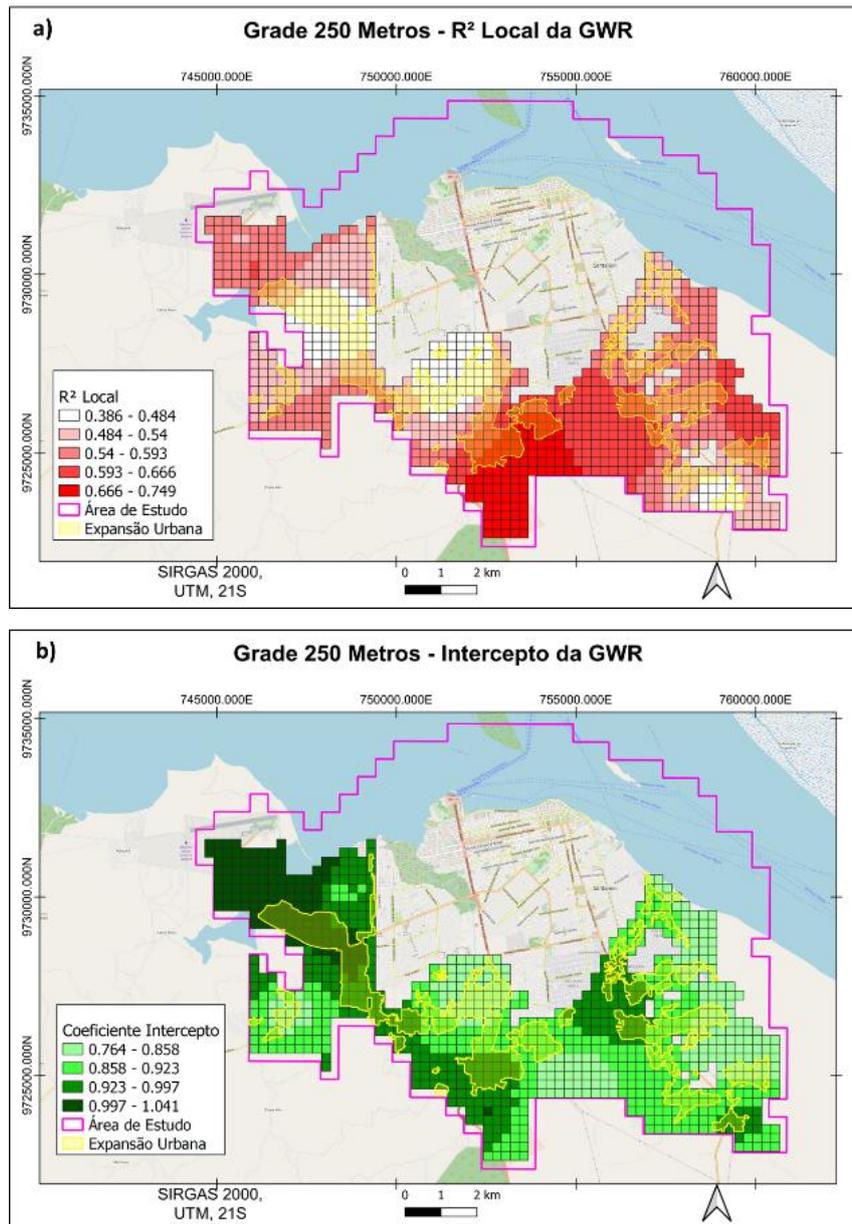


Figura 4: a) R quadrado local da GWR e b) valores do intercepto.

Verificando os valores significativos de cada coeficiente das variáveis explicativas, é visto que estas possuem influência diferente em cada local. Algumas estão presentes em quase toda área de estudo e outras possuindo

significância apenas para determinadas localidades. No caso, os coeficientes das variáveis físicas são influentes apenas em determinadas localidades, sendo de interesse compreender como essas influências ocorrem.

Os coeficientes de declividade (figura 5a) são predominantemente negativos, mas possuindo majoritariamente valores negativos, indicando que o aumento da declividade não favorece a expansão urbana. Os valores mais baixos estão presentes na parte oeste da área de estudo e também próximos ao rio. Entretanto, alguns locais possuem valores positivos, sendo diferente do esperado e indicando que nesses locais a declividade favorece o crescimento urbano.

Já os coeficientes de platô (figura 5b) possuem praticamente todos os valores positivos, principalmente nas áreas oeste e sul da área de estudo. As localidades onde o terreno é classificado como platô favorece a expansão urbana. Entretanto, algumas células possuem valores negativos, indicando que esta classificação de terreno não favorece a expansão urbana. Desta maneira, tanto a declividade quanto o platô possuem valores não esperados inicialmente (valores positivos para declividade e negativo para platô) e que devem ser estudados para melhor compreender como eles se comportam e influenciam cada localidade.

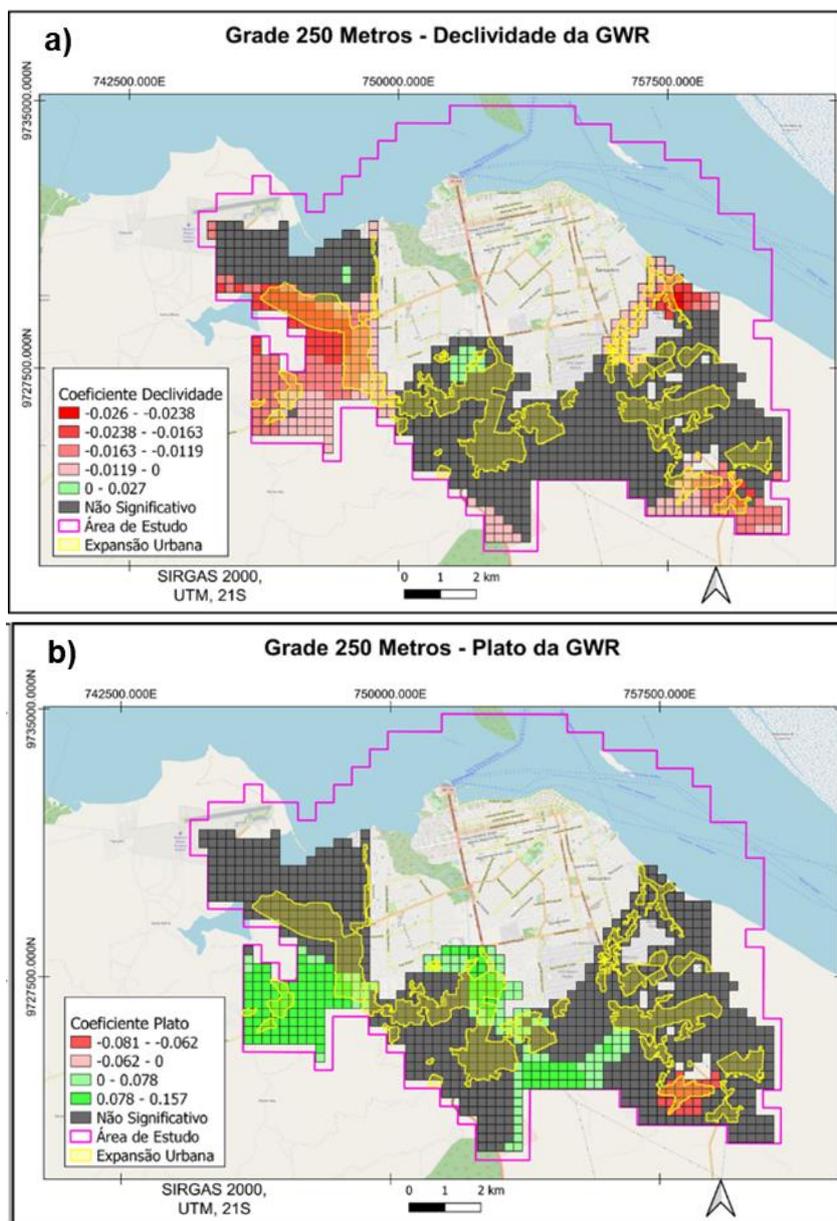


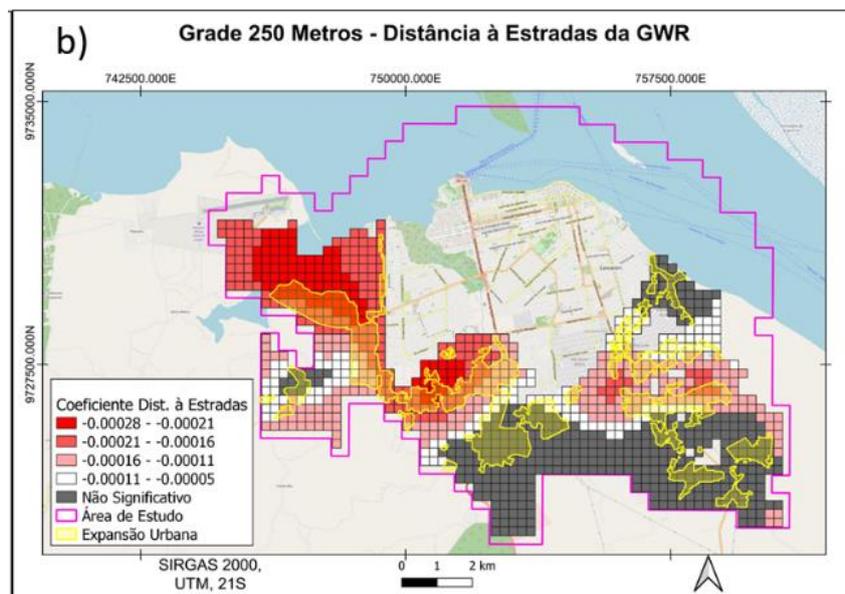
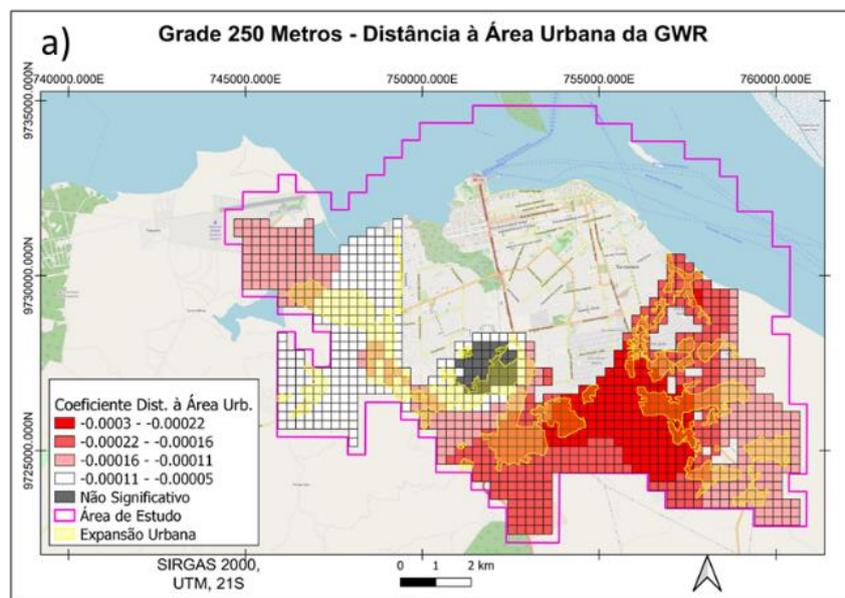
Figura 5: Coeficiente de declividade (a) e platô (b) da GWR.

Das variáveis antrópicas, os coeficientes de distância a áreas urbanas anteriores são negativos e são mais influentes na parte sudeste, próximo à rodovia Curuá-Una, com os valores sendo menos influentes na parte oeste da área de estudo. Desta forma, a distância à área urbana apresenta menor influência para a expansão de áreas urbanas na parte oeste da sede do município, na direção ao aeroporto (figura 6a).

Por outro lado, os coeficientes de distância a estradas (figura 6b) são negativos e possuem maior influência na parte oeste e diminuindo em sentido leste.

Entretanto, em algumas partes a sul e sudoeste da área de estudo, os coeficientes têm menor influência.

Já os coeficientes de população (figura 6c) possuem valores positivos e negativos, indicando que em determinados locais uma maior população em 2010 contribui para a expansão urbana (valores positivos) ou dificultam (valores negativos). Os locais com valores negativos estão mais ao sul da sede do município, enquanto os positivos estão presentes em áreas mais distantes. Seria necessário verificar posteriormente esses diferentes valores dos coeficientes junto às características da expansão nesses locais devem auxiliar no entendimento dos valores obtidos.



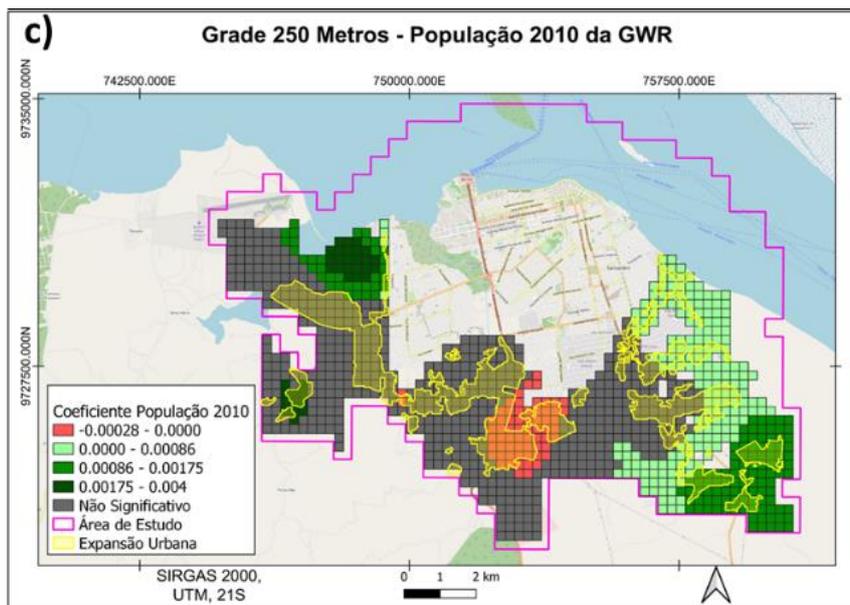


Figura 6: coeficientes de (a) distância a áreas urbanas, (b) distância a estradas e (c) população em 2010.

Por fim, os valores dos coeficientes de classes de uso e cobertura com potenciais econômicos de conversão para áreas urbanas possuíram em geral valores positivos. Os coeficientes das classes de potencial médio de conversão possuem em sua maioria valores positivos, sendo mais influentes no extremo oeste e leste da área de estudo, além de locais próximos a área urbana de 2004. Isso indica que nessas localidades a presença das classes de mosaico de ocupações, e pasto sujo tem uma influência positiva na expansão urbana. Entretanto, para algumas células próximas a áreas de expansão os coeficientes foram negativos, indicando que a presença dessas classes desfavoreceu o crescimento urbano e sendo um resultado diferente do esperado para a variável.

Já os coeficientes das classes de potencial baixo de conversão possuem somente valores positivos sendo mais influentes ao sul da área de estudo e próximo ao rio. Assim, a classe pasto limpo, para essas localidades, favoreceu a expansão urbana. Além disso, valores mais influentes também são vistos mais a oeste da área de estudo, indicando que também favorecem para a expansão urbana nesses locais. Ambas as classes de baixo e médio potencial eram esperadas que tivessem coeficientes positivos.

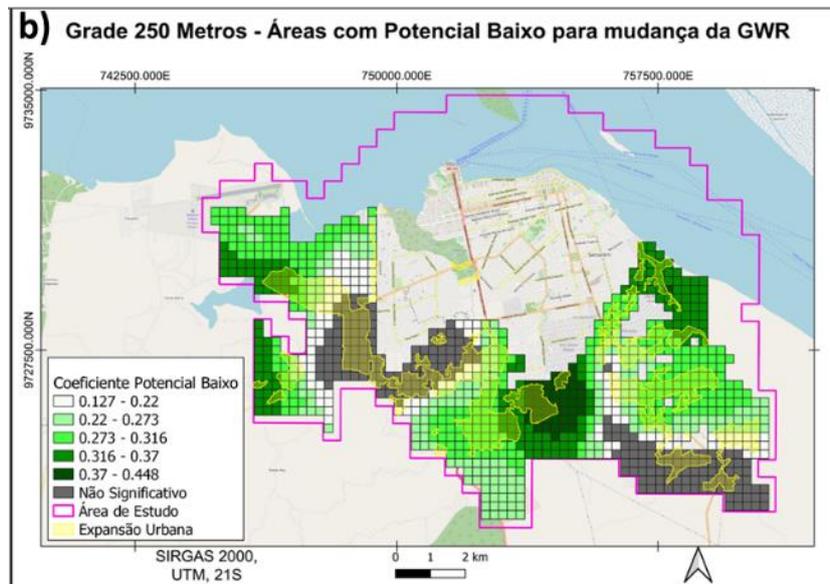
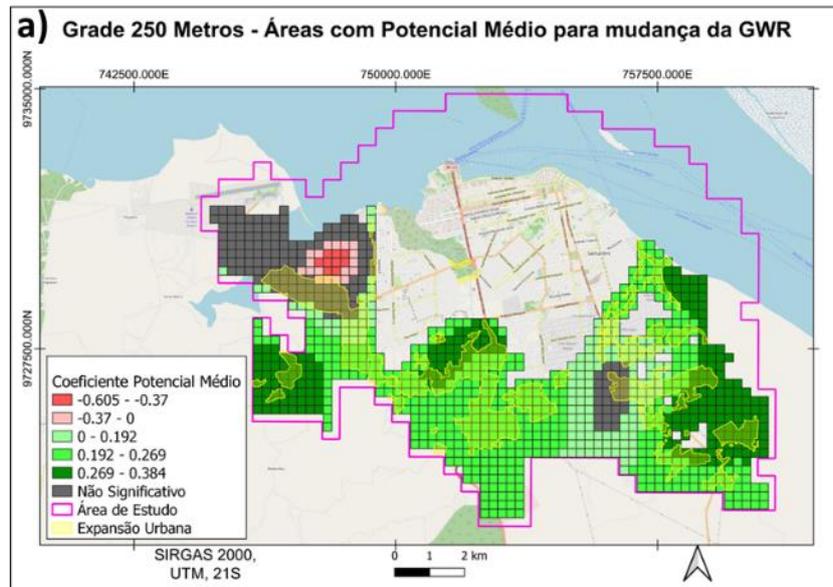


Figura 7: coeficientes de (a) áreas com potencial médio para mudança e (b) áreas com potencial baixo para mudança.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho buscou explorar elementos que possam influenciar na expansão urbana da sede do município de Santarém. Foram investigados a partir da literatura quais possíveis elementos que possam influenciar de maneira positiva ou negativa no crescimento urbano do local de estudo. Procedimentos metodológicos e estatísticos foram seguidos para selecionar as variáveis e validar o seu uso para enfim ser aplicado o método GWR.

Os resultados da GWR indicam como as variáveis influenciam de maneira diferente a expansão urbana na sede do município. Enquanto algumas variáveis influenciam toda a área, outras possuem influências em locais específicos. Além disso, certas variáveis tiveram respostas diferentes do esperado. Desta maneira, foi possível explorar como diferentes fatores influenciam na expansão urbana da área de estudo.

Por fim, novas questões surgem, como a interação que ocorre em determinados locais com as variáveis explicativas. Analisar quais as características das áreas de expansão junta com as variáveis utilizadas auxiliará numa melhor compreensão das dinâmicas presentes. Além disso, o uso de diferentes variáveis e uma ampliação da área de estudo podem revelar outras influências não identificadas neste estudo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, C. A.; COUTINHO, A. C.; ESQUERDO, J. C. D. M.; ADAMI, M.; VENTURIERI, A.; DINIZ, C. G.; DESSAY, N.; DURIEUX, L.; GOMES, A. R. High spatial resolution land use and land cover mapping of the Brazilian Legal Amazon in 2008 using Landsat-5/TM and MODIS data. **ACTA AMAZONICA**, v. 46, n.3, p. 291-302, 2016. Disponível em: <<https://www.scielo.br/pdf/aa/v46n3/1809-4392-aa-46-03-00291.pdf>>. Acesso em: 20 maio 2021.

BRASIL. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **Topodata: banco de dados geomorfométricos do Brasil**. Variáveis geomorfométricas locais. São José dos Campos, 2008. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/>>. Acesso em 15 nov. 2021.

UFMG – CSR. **CSRMaps**. Belo Horizonte, 2017. Disponível em: <<https://maps.csr.ufmg.br/>>. Acesso em 01 dez. 2021.

DAL'ASTA, A. P., AMARAL, S., & MONTEIRO, A. M. V. Sensoriamento remoto para a caracterização intraurbana de cidades Amazônicas: uma abordagem classificatória híbrida para o caso da cidade de Santarém (PA). In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, 17, 2015, João Pessoa. **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, João Pessoa: INPE, 2015, p. 2661-2668. Disponível em: <>. Acesso em 10 nov. 2021.

D'ANTONA, A. O.; BUENO, M, C, D. Grades Estatísticas no Estudo da Dispersão Urbana - Superação dos Limites das Unidades Administrativas e Operacionais Censitárias, Dispersão Urbana e Mobilidade Populacional. In: OJIMA, R.; JUNIOR, E. M. **Dispersão urbana e mobilidade populacional: implicações para o planejamento urbano e regional**. São Paulo: Blucher, 2016. Disponível em: <<https://openaccess.blucher.com.br/download-pdf/286>>. Acesso em 10 nov. 2021.

GOMES, T. do V.; CARDOSO, A. C. D.; COELHO, H. S. e OLIVEIRA, K. D. Santarém (PA): um caso de espaço metropolitano sob múltiplas determinações. **Cadernos MetrÓpole**, v. 19, n.40, p.891-918, 2017. Disponível em: <<http://cadernosmetropole.net/system/artigos/arquivos/000/000/407/original/4009.pdf?1513013701>>. Acesso em: 1 nov. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Grade estatística**. Rio de Janeiro, 2016. Disponível em:<<http://mapas.ibge.gov.br/interativos/grade.html>>. Acesso em 10 nov. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Regiões de influência das cidades**. Rio de Janeiro, 2018.

OLIVEIRA, J. M. G. C. Expansão urbana e periferização de Santarém-PA, Brasil: questões para o planejamento urbano. In: COLÓQUIO INTERNACIONAL DE GEOCRÍTICA ACTAS, 10, 2008, Barcelona. **Anais...** Barcelona: Univesitat de Barcelona, 2008.

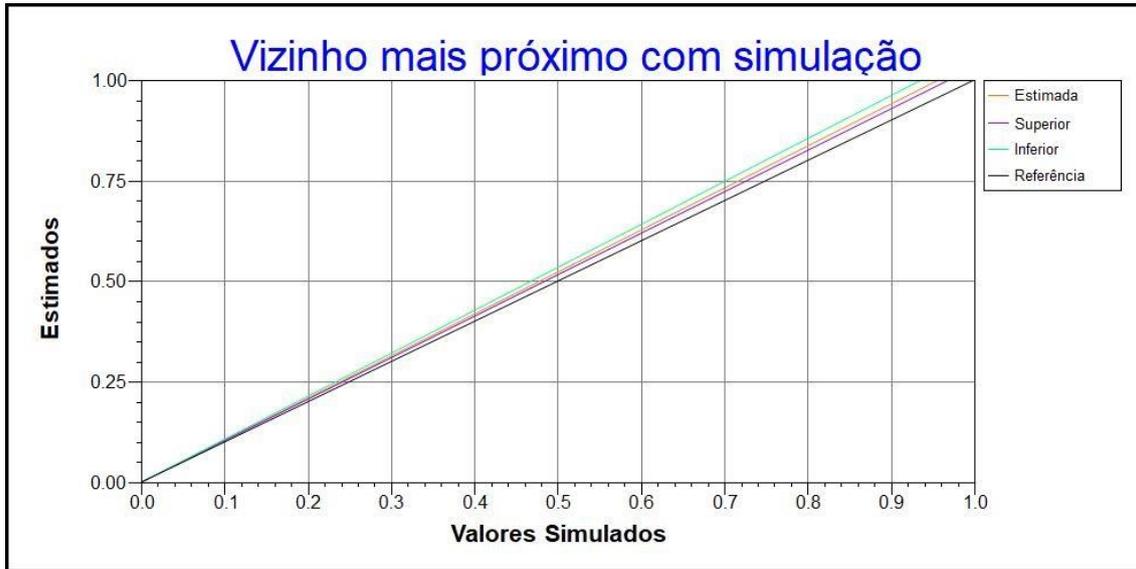
PINHEIRO, T. F.; RENNÓ, C. D.; ESCADA, M. I. S. Mapeamento de ambientes de terra firme no Distrito Florestal Sustentável da BR-163 utilizando o descritor de terreno HAND. In: PINHEIRO, T. F.; RENNÓ, C. D.; ESCADA, M. I. S. **Distrito Florestal Sustentável da BR-163: dinâmicas sociais, mudanças ambientais e produção florestal**. Belém: MPEG, 2015.

RAMOS, F. R. **Três ensaios sobre a estrutura espacial urbana em cidades do Brasil contemporâneo: economia urbana e geoinformação na construção de novos olhares**. 2014. 177p. Tese (Doutorado em Administração Pública e Governo) - FGV - Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, 2014. Disponível em: <https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/FGV_94025ab8efeeb8639946de081690ae4e>. Acesso em 10 nov. 2021.

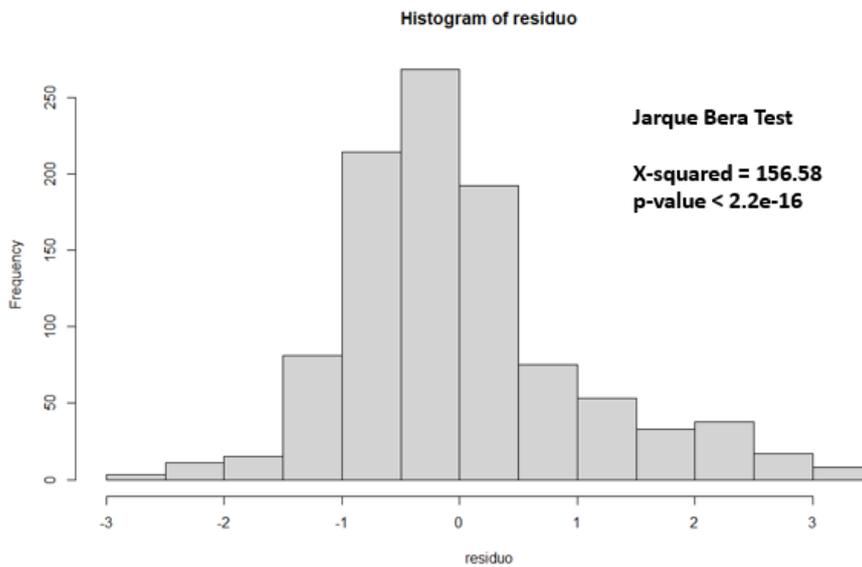
YU, D.L.; PETERSON, N.A.; REID, R.J. Exploring the impact of non-normality on spatial non-stationarity in geographically weighted regression analyses: tobacco outlet density in New Jersey. **GIScience & Remote Sensing**, v.46, n. 3, pp. 329-346, 2009. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.2747/1548-1603.46.3.329?casa_token=9wQPAqnuCn0AAAAA:WQA5pkNiMYYVv-M3PbFDpxg28-ciq9wrv4HSQNA-ACffuNG3-OVUxepytsUvUVHzO-KRdEMZeNzl9w>. Acesso em 10 dez. 2021.

ZHANG, L.; WEI, Y.D.; MENG, R. Spatiotemporal Dynamics and Spatial Determinants of Urban Growth in Suzhou, China. **Sustainability**, v.9, n.3, p.393-415, 2017. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/9/3/393>>. Acesso em 10 dez. 2021.

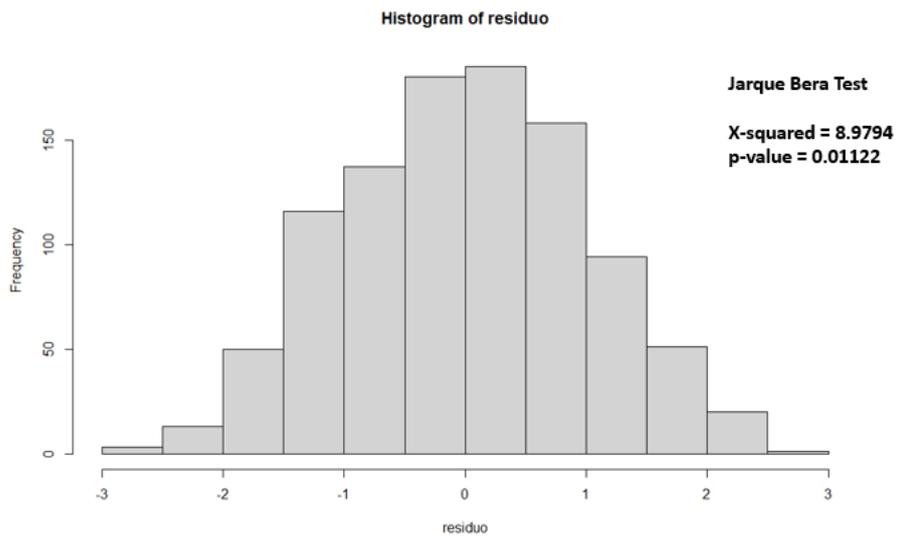
7. APÊNDICE



Função vizinho mais próximo para área de expansão demonstrando agrupamento dos dados.



Histograma dos resíduos da OLS sem transformação BoxCox.



Histograma dos resíduos da OLS com transformação BoxCox (0.05).