ANÁLISE DOS FATORES ENVOLVENDO OS REGIMES ESPACIAIS DAS LUZES NOTURNAS NA AMAZÔNIA BRASILEIRA

Gabriel da Rocha Bragion¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Av. dos Astronautas, 1.758, CEP 12227-010, SJC- SP, Brasil, gabriel.bragion@inpe.br.

RESUMO

As fontes de luzes noturnas podem ser associadas aos diferentes eventos na superfície terrestre. Embora as luzes noturnas persistentes se relacionam com a infraestrutura de artefatos antropogênicos, a conversão desses dados de radiância em informações úteis sobre aspectos socioeconômicos e físicos de uma região não é trivial, principalmente em um contexto tão complexo quanto o amazônico. Neste trabalho, exploramos a relação de algumas variáveis recorrentes na literatura, citadas como fatores que influenciam a presenca e intensidade de luzes noturnas, com a intensidade dessas luzes no estado do Pará, Brasil, em escalas variando de células de 9,216 km² até 9 km². Para isso, utilizamos o coeficiente de determinação de Pearson, o Índice de Moran Global e o Índice de Moran Local. Os coeficientes de determinação (R²) calculados a partir da associação da radiância total de luzes e a densidade de residências varia entre 0.7167 e 0.8216. Já o índice global Moran univariado tem uma faixa de variação maior, a depender da escala de análise e do conceito de vizinhança adotado (0.02344 até 0.5834). Foi identificado através do Índice de Moran Local que, embora a densidade de endereços residenciais e a radiância total tenham um alto grau de associação linear, estas variáveis apresentam regimes espaciais destoantes em várias localidades. Por fim, foram identificados possíveis drivers os regimes espaciais significativos identificados. Com isso, foi concluído que as luzes noturnas não são autocorrelacionadas apenas devido à natureza física de seu sensoriamento, mas também devido à sua associação com processos socioeconômicos.

Palavras-chave — Luzes noturnas, VIIRS, LISA, Amazônia, Índice de Moran.

1. INTRODUÇÃO

As luzes noturnas são os vestígios antropogênicos mais evidentes na superfície terrestre. Durante o dia, a Terra vista do espaço é um complexo arranjo de características geográficas e atmosféricas, de tal magnitude que a presença humana pode passar despercebida. Entretanto, em face a escura paisagem, as criações humanas se destacam junto aos outros fenômenos transientes, como raios, auroras e queimadas [1].

Em 2011 o sensor Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) é posto em órbita a bordo do satélite Suomi-NPP e passa a ser a mais importante ferramenta de imageamento noturno da atualidade. Dentre suas 21 bandas, a Day Night Band (DNB) foi empregada justamente com o intuito de registrar de modo contínuo a atmosfera e superfície durante a noite. No âmbito socioeconômico, trabalhos como o de Chen et al. [2] e Bennet e Smith [3] demonstram o potencial dos produtos VIIRS para estimar variáveis mais específicas, relativas a contextos locais, como a taxa de imóveis desocupados em áreas metropolitanas, crescimento e declínio econômico, urbanização e monitoramento de desastres e áreas de conflito.

Neste contexto, Levin e Zhang [4] trazem um estudo sobre as variáveis que apresentam algum grau de correlação com luzes noturnas em áreas metropolitanas ao redor do globo. A relação entre os dados de luzes noturnas e outras variáveis é amplamente discutida, principalmente porque as luzes noturnas refletem um aspecto restrito sobre a paisagem: níveis de radiância durante a noite. Associar esta variável com quaisquer outros fenômenos é uma tarefa árdua, principalmente porque a luz noturna resulta de diversos processos, sejam eles naturais ou antrópicos. Na tentativa de utilizar os dados de luzes noturnas como ferramenta de monitoramento de processos geográficos, isto é, que têm representação no espaço, muitos trabalhos focam as suas análises nas composições estáveis desses dados. Composições estáveis são basicamente uma média dos níveis de radiância registrados durante a noite com determinado nível de qualidade. Ao utilizar esta técnica de processamento, espera-se que os aspectos efêmeros das luzes noturnas possam ser ignorados, ou ao menos, minimizados [5]. Dessa forma, os dados de luzes noturnas estáveis (LNE) podem utilizados como proxies de outras variáveis, teoricamente.

Na prática, generalizar a relação que as LNE mantêm com outros aspectos da paisagem humanizada pode não ser uma alternativa viável. A escala de análise abordada até o momento ainda é pequena demais para inferir processos socioeconômicos baseados nos dados de LNE. A consequência disso é uma série de estudos que se limitam às escalas mais gerais, como municipais ou provinciais [6, 7]. Ainda assim, existem trabalhos que se propuseram a investigar a utilidade dos dados LNE em escalas maiores. No entanto, nenhuma das vertentes apresentou uma comparação sistemática do efeito da escala sobre a relação entre os dados de luzes noturnas e a sua dependência espacial, bem como a relação dos dados de LNE e outras variáveis.

Neste sentido, este trabalho se propõe a investigar a forma com que os dados de luzes noturnas se autocorrelacionam espacialmente em diversas escalas de análise, bem como com outras variáveis que mantenham uma relação significativa com estes dados. Para isso, é demonstrado o grau de associação entre os dados de luzes noturnas, a densidade da malha viária e a densidade de endereços residenciais. Por fim, foram investigados os possíveis *drivers* dessas associações espaciais e discutida a consequência disso na construção de métodos que introduzam as variáveis de LNE na construção de modelos preditivos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudos

O estado do Pará é uma das 27 unidades federativas brasileiras, sendo a segunda maior em extensão territorial e com uma população de aproximadamente 8.513.497 habitantes [8]. Devido a sua abrangência, o estado tem uma variedade vegetativa muito grande, mas com predominância do bioma floresta amazônica (Figura 1).



Figura 1. Área de estudo: Estado do Pará, Brasil.

O estado se desenvolveu a partir de diversas bases econômicas centradas no extrativismo. Além de ser a maior economia da Região Norte, é o maior produtor de Bauxita, Caulim e Manganês do país, e o segundo maior produtor de minério de ferro. Pará também lidera a produção de pesca extrativa e ocupa a quinta posição na produção bovina. Embora seja o segundo maior saldo na balança comercial brasileira, a taxa de pobreza é de 32%, quarta maior do país [9].

2.2 Base de dados

2.2.1 Malhas territoriais

As referências espaciais de setores censitário e do limite político-adminitrativo do estado do Pará foram obtidas mediante acesso em: https://www.ibge.gov.br/geociencias-novoportal/downloads-geociencias.html; grades celulares (3x3 km, 6x6 km, 12 x 12 km, 24 x 24 km, 48 x 48 km e 96 x 96 km). O censo demográfico de 2010 classifica cada setor censitário da seguinte forma: área urbanizada de cidade ou vila; área não-urbanizada de cidade ou vila; área urbana isolada; aglomerado rural de extensão urbana; aglomerado

rural isolado (povoado); aglomerado rural isolado (núcleo); aglomerado rural isolado (outros aglomerados); zona rural, exclusive aglomerado rural.

2.2.2 Day Night Band

Comparado ao seu predecessor, o sensor *Operational Linescan System* (OLS), a banda DNB tem melhorias dramáticas quanto suas resoluções radiométrica, espacial e espectral. A banda DNB tem uma quantização radiométrica de 14-bits e largura de faixa de 3,000 km. Para alcançar consistência espacial, um programa a bordo do instrumento agrega as células de sub-pixel representadas pelos detectores em 32 modos diferentes, variando em relação às direções de voo e varredura. O resultado é uma distância de amostra de solo (em inglês, *Ground Sample Distance*, GSD) de aproximadamente 743 \pm 43 metros na direção de varredura e 755 \pm 22 metros na direção de voo [5].

Os dados do sensor VIIRS utilizados neste estudo consistem nas composições mensais com menor defasagem temporal disponíveis, referentes ao ano de 2012 (abril – dezembro), disponibilizadas pela *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) [10]. Cada composição mensal consiste em uma média dos níveis de radiância de observações livres de nuvens registradas pelo sensor diariamente, mas que ainda não foram submetidas a um processo de remoção de luzes efêmeras e valores anômalos não associados às luzes estáveis, como fogo, embarcações hídricas, radiação retroespalhada e iluminação lunar. Cada composição mensal está associada a uma composição que informa o número de observações livres de nuvens que resultaram no produto de radiância média mensal.

A NOAA também disponibiliza composições anuais que já foram submetidas ao processamento de remoção de luzes efêmeras, porém a composição anual com menor defasagem temporal em relação aos dados da malha viária e endereços residenciais refere-se ao ano de 2015. Foi adotado um método adaptado que adota as composições mensais de 2012 como base de dados e inclui a composição anual de 2015 como máscara de filtragem [11]: o valor 1 é atribuído aos pixels da composição anual de 2015 com níveis de radiância maiores que 0; o valor 0 é atribuído aos pixels da composição anual de 2015 com níveis de radiância iguais ou menores que zero, resultando em uma máscara binária; são selecionadas as composições mensais do ano de 2012 que tenham ao menos 99% dos seu pixels com um número mínimo de observações livres de nuvens igual ou superior a três; é calculada a média entre as composições mensais do ano de 2012; o valor 0 é atribuído à pixels da composição média de 2012 com valores menores que 1.5E+09 nW/cm2.sr; é calculado o produto entre a máscara binária referente aos valores de 2015 e o resultado da operação de média das composições mensais. O resultado é uma composição referente à média das composições mensais de 2012 que tenham 99% dos pixels com número de observações livres de nuvens maior que três (10% do máximo de observações livres de nuvens possíveis) e livres dos

valores nulos da composição de 2015. Dessa forma atenuamse os problemas de defasagem temporal, que se limitam à divergência entre os valores de radiância entre 2012 e 2010 e luzes efêmeras referentes às composições de 2012 registradas em pixels com localização concorrente aos pixels da composição de 2015 registrados como estáveis, cuja média totalize um valor superior ao limiar estabelecido.

2.2.3 Densidade da malha viária

A densidade de endereços residenciais (DV) foi obtida a partir da intercepção entre os vetores referentes à malha viária para o ano de 2010 e as grades celulares, no programa TerraView 5.3.1. A base de dados é anualmente atualizada e integra vias oficias e não oficias identificadas por imagens do sensor *Thematic Mapper* (TM) *e Enhanced thematic mapper* (ETM+), a bordo dos satélites integrantes das missões Landsat [12].

2.2.4 Densidade de endereços residenciais

Os dados de endereços referem-se ao Cadastro Nacional de Endereços para fins Estatísticos (CNEFE), disponibilizados pelo IBGE, coletados de forma sistemática a cada censo demográfico, a partir do ano 2000. Para este trabalho, apenas os endereços para fins residenciais compuseram a base de dados. Os dados são disponibilizados em formato vetorial, onde a menor geometria refere-se a face de um logradouro. O número de domicílios e estabelecimentos são então associados a cada uma destas unidades. A densidade de endereços residenciais (DR) foi obtida a partir da intercepção entre as faces de logradouros e as grades celulares, no programa TerraView 5.3.1.

2.3 Autocorrelação espacial

A Análise de autocorrelação espacial global foi identificada com a partir da estimação do índice de Moran Global univariado (LN) e bivariado (LN vs DV ou DR) [13]. Para dada unidade de análise, a relação espacial entre as variáveis LN e DV ou DR (simultaneamente representadas por densidade K em diante, para fins ilustrativos) pode ser medida utilizando os quatro quadrantes que correspondem aos quatro possíveis tipos de associação espacial (Figura 2):

- Alto nível de LN circundado por alta densidade K (HH);
- Baixo nível de LN circundado por baixa densidade K (LL);
- Baixo nível LN circundado por alta densidade K (LH);
- Alto nível LN circundado por baixa densidade K (HL).



Figura 2. Quatro quadrantes correspondentes aos quatro regimes espaciais possíveis na análise de autocorrelação espacial bivariada das variáveis LN e K (DV e DR). O método univariado dispõe da mesma variável na unidade celular em questão e em sua vizinhança (LN).

Se uma unidade celular é identificada como LL (ou HH), essa unidade apresenta valores de LN abaixo (ou acima) da média da amostra, assim como sua vizinhança (LN para univariado e K para bivariado). Se uma unidade celular é identificada como LH (ou HL) essa unidade apresenta valor de LN abaixo (ou acima) da média da amostra, contrariamente à sua vizinhança, que apresentará valor acima (ou abaixo) da média da amostra (LN para univariado e K para bivariado).

O método LISA permite a identificação de possíveis *clusters* associados a estes padrões, mesmo que a autocorrelação global tenha sido identificada como fraca [13]. Empregou-se este método como ferramenta para detectar relações locais entre as luzes noturnas (LISA univariado) e entre as luzes noturnas e as variáveis DV e DR (LISA bivariado). O cálculo do LISA univariado (I_i) é feito da seguinte forma:

$$I_i = z_i \sum_{j=1}^N w_{ij} z_j \tag{1}$$

$$z_{i,k} = (X_i - X_{i,médio}) / \sigma_X$$
(2)

onde N é o número de unidades espaciais; X_i é o valor da variável de interesse para a *i*ésima unidade, e $X_{médio}$ é a média da variável; w_{ij} é o peso espacial entre a *i*ésima e *j*ésima unidades espaciais; σ_x é desvio padrão da variável. A significância de I_i pode ser calculada a partir do método de permutação aleatória condicional. O método permuta aleatoriamente os vizinhos de uma célula, mantendo sua posição fixa. Para cada permutação, o índice LISA é novamente calculado. Dessa forma, é possível estimar empiricamente a distribuição do índice I_i e prosseguir com o teste sob a hipótese nula de aleatoriedade espacial, podendo ser utilizado para avaliar a significância da autocorrelação espacial local observada.

$$I_{i,kl} = z_{i,NTL} \sum_{j=1}^{N} w_{ij} z_{j,K}$$
(3)

$$z_{i,K} = (X_{i,K} - X_{K,m\acute{e}dio})/\sigma_K \tag{4}$$

$$z_{i,NTL} = (X_{i,NTL} - X_{NTL,médio}) / \sigma_{NTL}$$
(5)

onde *N* é o número de unidades espaciais; $X_{i,K} e X_{i,NTL}$ são os valores das variável K e NTL para a *i*ésima unidade, respectivamente; $X_{K,médio}$ e $X_{NTL,médio}$ são as médias das variáveis K e NTL, respectivamente; w_{ij} é o peso espacial entre a *i*ésima e *j*ésima unidades espaciais; $\sigma_{K} e \sigma_{NTL}$ são as variâncias das variáveis K e NTL, respectivamente. O Índice de Moran Global univariado, Índice de Moran Global bivariado, LISA univariado e LISA bivariado foram calculados no programa GeoDa 1.12.1.169 [14].

Por fim, cada célula com autocorrelação espacial significativa (pseudo $\alpha = 0.01$) foi associada aos tipos de setores que são sobrepostos por ela, excetuando-se zonas rurais que não disponham de aglomerados, sendo estas consideradas áreas não-válidas, de modo que sua área não integre a composição do percentual total de tipo de setor por célula.

3. RESULTADOS

3.1 Análise de correlação linear

Com o intuito de identificar o grau de associação entre as variáveis DV, DR e LN, foram calculados os coeficientes de determinação referentes à um modelo de regressão linear para cada uma das escalas de análise (Tabela 1). Os coeficientes mostram que o maior grau de associação entre as variáveis independentes DV e DR e a variável dependente LN são obtidos quando as variáveis são generalizadas à escala de 96x96 km ($R^2 = 0.06898$ e $R^2 = 0.8216$, respectivamente), sendo que a variável DV apresentou um coeficiente significativo somente nesta escala. A variável DR apresentou valores elevados de R^2 para todos os casos ($R^2 > 0.70$), sendo que o menor coeficiente é obtido na escala 3x3 km ($R^2 = 0.7167$).

Tabela 1 – Coeficientes de determinação (\mathbb{R}^2) entre a radiância total (LN) e densidade de vias (DV), e LN e densidade de endereços residenciais (DR), para tamanhos de células variados. α =0.05, (-) não significativo.

	R ²	
Célula (km x km)	DV	DR
96	0.06898	0.8216
48	-	0.7635
24	-	0.7677
12	-	0.7493
6	-	0.7944
3	-	0.7167

A variação dos valores dos coeficientes R² explicita uma relação não monotônica entre a escala de análise e o grau de associação linear entre as variáveis DR e LN. Não é possível

identificar evidências da preponderância de dependência espacial entre as variáveis sobre ocorrência de processos particulares a cada uma das escalas de análise. A alternância dos coeficientes R² associada as diferentes escalas de pode ocorrer devido a presença de modelos que não são generalizáveis, isto é, se restringem à escala e área de estudo sobre a qual foram estimados. Por outro lado, a natureza dos dados em questão pode também induzir a má especificação de um modelo, caso a dependência espacial não seja interpretada como parte do problema, seja ela associada à variável dependente ou às variáveis independentes, ou ambas [13].

3.2 Autocorrelação espacial

3.2.1 Índice de Moran Global

A análise de autocorrelação espacial global univariada (IGu) refere-se apenas à variável LN. Optou-se por proceder a análise de correlação espacial global bivariada (IGb) apenas entre as variáveis LN e DR, sendo a primeira variável a referência e a segunda associada às células que configuram sua vizinhança.

A configuração de vizinhança que apresentou maior autocorrelação espacial global, tanto univariada quanto bivariada, foi a de células com vértices de 3 x 3 km e vizinhança contígua de primeira ordem segundo o método *Queen* (Figura 3). Quando comparados as demais ordens associadas à mesma escala, todas as escalas de análise apresentaram valores de IGu (0.5834) e IGb (0.4346) maiores sob a matriz de vizinhança de primeira ordem. O tamanho de célula com menor IGu e IGb segundo a primeira ordem de contingência é a de 48 x 48 km (0.0951 e 0.1121, respectivamente), seguida da 96 x 96km (0.1072 e 0.1357, respectivamente).



Figura 3 - a. Índice de Moran Global univariado (IGu) da radiância total associada a cada célula (LN) e b. Índice de Moran global bivariado (IGb), sendo variável de referência LN e variável de vizinhança densidade de vias (DV). Nota: Eixos das abcissas representam o comprimento da aresta de cada célula. Os eixos das ordenadas representam as variáveis IGu e IGb. Colunas com diferentes tons representam a ordem de contingência da matriz de vizinhança baseada na regra *queen*, incluindo internos.

Os valores de IGu associados a cada escala de análise são praticamente monotônicos, isto é, aumentam a medida que o tamanho da célula diminui, excetuando-se as células 96 x 96 km e 48 x 48 km, que têm valores similares, mas que não acompanham a mesma tendência. A alteração da escala de análise, quando comparada à alteração da ordem de contingência da matriz de vizinhança, exerce maior influência sobre à variação do IGu. Todas as observações supracitadas também se aplicam ao IGb. Dessa forma, segundo o delineamento experimental apresentado, a autocorrelação espacial global, tanto univariada quanto bivariada, é mais sensível à variação da escala de análise do que é sensível à variação da matriz de vizinhança.

3.2.2 Índice de Moran Local Univariado

Mais de um regime espacial local foram identificados nas escalas 3, 6, 12 e 24 x 24 km. Nas escalas 48 e 96 x 96 km, apenas a RMB apresentou regimes espaciais significativos (pseudo p > 0.001), onde as regiões centrais mais próximas do núcleo têm regime HH. As áreas de ocupação periféricas, assim como vilas e vilarejos no entorno da RMB, apresentam baixos níveis de radiância comparados aos valores centrais que compõe a sua vizinhança, caracterizando-as coo LH. Nas demais escalas, o mesmo processo de áreas nucleares da RMB com regime HH e periferias com regime LH ocorre, retratando os altos níveis de radiânca da região comparados às demais regiões do estado. (APÊNDICE A, B, C e D).

Na escala 3 x 3 km, a maioria das células HH tem maior proporção de área urbanizada (mediana 100%), seja ela de cidade ou vila. No entanto, diversos outros tipos de setores também ocorrem nas células, excetuando-se apenas áreas urbanizadas isoladas e áreas rurais isoladas. Os regimes HL são caracterizados por aglomerados rurais isolados e áreas urbanas de cidades ou vilas. Essas áreas urbanas não são consideradas isoladas devido a sua posição geográfica, mas não apresentam vizinhos imediatos com altos valores de NTL ou extensão territorial suficientemente grande para que sejam classificados como HH (APÊNDICE A).

Em células 6 x 6 km, muitos núcleos que haviam sido classificados como LH passam a ser classificados como HH, pois o aumento do tamanho das células permite que estas estejam em contato com núcleos vizinhos antes também classificados como LH. Nesta escala de análise, ainda há predominância de núcleos urbanos sobrepostos pelas células HH com mediana superior a 75%, o que denota uma representatividade maior de outros tipos de setores ou áreas rurais não habitadas. Outros tipos de setores mantém uma mediana de 0% (APÊNDICE B).

Núcleos classificados como HH nas escalas $3 \times 3 \text{ km}$ e $6 \times 6 \text{ km}$ passam a ser classificados como HL na escala $12 \times 12 \text{ km}$ (APÊNDICE C). As células HL e LH que compunham as duas primeiras escalas são associadas a mesma célula na escala $12 \times 12 \text{ km}$, de modo que não disponham mais de valores de luzes relativamente altos, sendo classificados como HL. Apenas núcleos urbanos mais representativos

assumem o regime HH (Tucuruí, Marabá, Parauapebas e Santarém). Outras sedes municipais assumem o regime HL. Na escala 24 x 24 km, apenas as municipalidades de Marabá e Parauapebas apresentam regimes espaciais HH. Outros núcleos apresentam regime espacial HL, distribuídos em setores do tipo urbano e aglomerados rurais. Nas escalas 48 x 48 km e 96 x 96 km, evidencia-se que o baixo grau de associação espacial global, porém significativo, é integralmente associado à RMB.

3.2.2 Índice de Moran Local Bivariado

Através do Índice Local de Moran Bivariado é possível identificar se uma variável associada a uma unidade espacial e outra variável associada à sua vizinhança tem valor diferente da média da população. Embora as variáveis LN e DR tenham alta correlação linear, os mapas do LISA bivariado e LISA univariado divergem quanto aos regimes espaciais identificados em diversas localizações.

Na escala 3 x 3 km, a distribuição dos dados no regime HH em relação ao tipo do setor é muito similar ao LISA univariado. No entanto, a frequência de células com regime HL é maior. Essas células são majoritariamente associadas aos setores rurais sem núcleos populacionais. Algumas células isoladas são associadas a núcleos rurais isolados. As células HL contíguas são associadas a empreendimentos e instalações minerários (Figura 4). Apenas a região de Santarém apresenta um número elevado de células HL contíguas são associadas a estes empreendimentos. Estas células são representam áreas de chácaras, balneário e instalações administrativas de fazendo com capital voltado para a agricultura intensiva (APÊNDICE A).



Figura 4 - Localização das células de 12 x 12 km em regime espacial HL.

Na escala 6 x 6 km, o mesmo padrão pode ser identificado, porém as células com regime HL apresentam uma maior participação dos setores de aglomerados rurais de extensão urbana e núcleos populacionais (APÊNDICE B). Na escala 12 x 12 km, todos os núcleos populacionais são associados ao tipo HL, exceto a RMB, que tem regime HH. Empreendimentos minerários também são identificados como HL, mas não se diferenciam dos núcleos populacionais quanto ao número de células contíguas. O regime LH também passa a ser frequente em algumas localidades onde a área urbanizada é pequena. Células de 24 x 24 km evidenciam áreas HH com distribuição por tipo de setor semelhante ao LISA univariado de mesma escala, predominância de áreas urbanizadas e aglomerados rurais. No entanto, as áreas HH se limitam à RMB, sendo que os núcleos populacionais menores associados às sedes municipais são caracterizados como HL (Apêndice C).

Nas escalas 48 x 48 km apenas a RMB é associada ao tipo HH, enquanto na 96 x 96 km, além do regime HH na mesma região, dois *clusters* do tipo LL são presentes. Neste caso, ambos com área integralmente rural.

4. DISCUSSÃO

Neste trabalho, foi evidenciado que há alto grau de associação linear estatisticamente significativa entre à densidade de residências e o nível de radiância total no território paraense. Também foi identificado que a radiância total é espacialmente autocorrelacionada em todas as escalas de análise, mas que a associação espacial é maior em escalas maiores. A relação espacial entre as luzes e a densidade de residências também é maior quando adotada uma escala mais fina de análise, no entanto o grau de associação, quando comparado à dependência univariada da radiância total, é menor.

A dependência espacial dos dados VIIRS parte de dois princípios distintos: o físico e o geográfico. O físico é intrínseco a própria natureza do dado. Níveis altos de radiância registrados pela banda DNB contaminam os pixels vizinhos devido ao efeito de retroespalhamento atmosférico e do próprio albedo da superfície [5]. Em grandes núcleos urbanos, esses pixels com valores elevados de radiância podem contaminar por centenas de metros. No entanto, essas distancia não é fixa e naturalmente depende de combinações de fatores além do albedo e das condições atmosféricas, como a estratégia organizacional de iluminação adotada, o tipo de fonte de luz (alógena, fluorescente, etc), a angulação e estrutura do mastro de fixação das luzes, entre outros [15].

O efeito causado pelo espalhamento das luzes noturnas é adereçado pela literatura como *overglow* e já foi extensivamente abordado, principalmente em trabalhos que buscam explorar a utilidade de dados de luzes noturnas para a delimitação de áreas urbanizadas. Esse tipo de abordagem geralmente busca identificar um limiar, seja fixo ou contextual, que permita excluir dados de luzes que tenham sido registrados devido ao efeito *overglow*. Entretanto, segundo a revisão conduzida pelo presente estudo, nenhum trabalho trouxe uma conclusão que permita dissociar o *overglom* dos níveis de radiância de pixels próximos. Até o momento, buscou-se suprimir valores de luzes onde não haja fontes de iluminação durante a noite, mas não foi abordado num contexto onde ambos disponham de estruturas de iluminação durante a noite.

Ma et al. [16] foram os primeiros a trazer uma reflexão sobre como lidar com a dependência espacial das luzes, propondo um método de partição dos dados a partir da análise de hotspots e coldspots de luzes. A dependência espacial das luzes em diferentes escalas investigadas no presente estudo aponta para evidencias de que as luzes não são somente espacialmente dependentes devido ao aspecto físico do seu processo de sensoriamento, mas também geograficamente dependente. Neste sentido, as luzes mantêm uma relação direta com a infraestrutura de iluminação publica. Foram apontadas evidencias que o regime espacial de aglomerados rurais e núcleos urbanos depende do tamanho da célula. Quando pequena (3 x 3 km até 12 x 12 km), ainda é possível que certo número de células sobreponham o trecho urbano de uma cidade, o que permite que estas células e sua vizinhança tenha valores altos de radiância, atribuindo o regime HH para o local. Já em escalas maiores, com 24 km x km, vários núcleos urbanizados passam a ser sobrepostos por apenas uma célula, de forma que apenas esta unidade espacial apresente valores elevados de radiância em relação à sua vizinhança, sendo então caracterizada como HL.

Comparando os resultados do LISA univariado e LISA bivariado, é possível observar que, embora a radiância total e a densidade de residências estejam estatisticamente associadas ($R^2 = 0.7493$ até 0.8216), as variáveis frequentemente não apresentam o mesmo regime espacial. Assim, outro aspecto evidenciado pela análise da dependência espacial do número de residências e da radiância total é a possibilidade de identificar feições que não estão associadas aos núcleos populacionais. Áreas onde há a presença de empreendimentos minerários tem valores altos de níveis de radiância total, porém carecem de um número significativo de endereços. Assim, essas áreas foram identificadas como células contíguas com regime HL, diferentemente de núcleos isolados associados a apenas uma célula. Embora em algumas escalas de análise o regime HL de células contíguas tenha sido associado integralmente às instalações de indústrias de capital elevado, principalmente mineradoras, não é possível afirmar a utilidade desde método para a identificação dessas estruturas, uma vez que o estudo carece de uma análise de omissão dessas áreas.

5. CONCLUSÃO

Este estudo propôs analisar a dependência espacial dos dados de luzes noturnas do sensor VIIRS, tanto consigo quanto com outras variáveis associadas à infraestrutura antrópica. Foi identificado que a dependência espacial dos dados de luzes noturnas do sensor VIIRS não é produto apenas da interação da luz com o meio no qual ela se propaga, mas também é resultado da forma com que as luzes noturnas refletem aspectos infraestruturais de áreas de ocupação humana.

Ao considerar a relação que as luzes noturnas mantêm com outras variáveis, é necessário que a análise dos

resultados aborde a consequência da escolha de determinadas escalas de análise, pois regimes espaciais e associações estatísticas não se mantém iguais sob a ótica de escalas diferentes. Embora exista um alto grau de associação entre as luzes noturnas e a densidade de residências, essas relações não são constantes, tanto no aspecto espacial quanto escalar, o que tornam os dados de luzes noturnas *proxies* não generalizáveis de processos e artefatos antrópicos, fator não comumente não considerado em estudos envolvendo estes dados.

7. REFERENCIAS

[1] CROFT, T. A. Nighttime Images of the Earth from Space. Scientific America, INC. p. 86 – 101, 1978.

[2] CHEN, Z., et al. Estimating House Vacancy Rate in Metropolitan Areas Using NPP-VIIRS Nighttime Light Composite Data. *IEEE Journal of Selected Topics* (...). V. 8, n. 5, p. 2188 – 2197, 2015.

[3] BENNETT, M. M.; SMITH, L. C. Advances in using multitemporal night-time lights satellite imagery to detect, estimate and monitor socioeconomic dynamics. *Remote Sensing of the Environment*. V. 192, p. 176-187, 2017.

[4] LEVIN, M; ZHANQ, Q. A global analysis of factors controlling VIIRS nighttime light levels from densely populated areas. *Remote Sensing of the Environment*, V. 190, p. 366-382, 2017.

[5] ELVIDGE, C. D., et al. Why VIIRS data are superior to DMSP for mapping nighttime lights. *Proceedings of the Asia-Pacific Advanced Network*. V. 35, p. 62-69, 2013.

[6] CHEN, Z., et al. Estimating House Vacancy Rate in Metropolitan Areas Using NPP-VIIRS Nighttime Light Composite Data. *IEEE Journal of Selected Topics* (...). V. 8, n. 5, p. 2188 – 2197, 2015. [7] SHI, K., et al. Evaluating the Ability of NPP-VIIRS Nighttime Light Data to Estimate the Gross Domestic Product and the Eletric Power Consumption of China at Multiple Scales: A comparison with DMSP-OLS Data. *Remote Sensing*. V. 6, p. 1705-1724, 2014.

[8] IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2018. *Panorama estado do Pará* – 2018. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/panorama. Acesso em: 21. Ago. 2018.

[9] FAPESPA. Diagnóstico Socioeconômico e Ambiental do Estado do Pará, 2018.

[10] CAO; CHANGYONG; DELUCCIA; FRANK; QIU; SHUANG e NOAA JPSS PROGRAM OFFICE (2012). NOAA JPSS Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) Sensor Data Record (SDR) from IDPS. NOAA National Centers for Environmental Information.

[11] WU, R.; YANG, D.; DONG, J.; ZHANG, L.; XIA, F. Regional Inequality in China Based on NPP-VIIRS Night-Time Light Imagery. *Remote Sensing*, v. 10, n. 240, feb. 2018.

[12] BRANDAO Jr; A. O; SOUZA Jr, C. M. Mapping unofficial roads with Landsat images: a new tool to improve the monitoring of the Brazilian Amazon rainforest. *International Journal of Remote Sensing*, v. 17, n. 1, Jan. 2006.

[13] ANSELIN, L.; BERA, A. K.; FLORAX, R.; YOON, M. J. Simple diagnostic tests for spatial dependence. *Regional Science and Urban Economics*, v. 26, 1996.

[14] ANSELIN, L.; SYABRI, I.; KHO, Y. GeoDa: An introduction to spatial data analysis. *Geogr. Anal.* 2006, 38, 5–22.

[15] MA, W.; LIN., P. An Object Similarity-Based Thresholding Method for Urban Area Mapping from Visible Infrared Imaging Radiometer Suite Day/Night Band (VIIRS DNB) Data. *Remote Sensing*, v. 10, n. 2, fev. 2018.

[16] MA, T.; YIN, Z.; ZHOU, A. Delineating Spatial Patterns in Human Settlements Using VIIRS Night-time Light Data: A Watershed-Based Partition Approach. *Remote Sensing*. V. 10, N. 465, p. 1–14, 2018.



APÊNDICE A Mapa LISA Univariado e Bivariado e distribuição de tipos de setor por regime espacial (3 x3 km)



Mapa LISA Univariado e Bivariado e distribuição de tipos de setor por regime espacial (6 x 6 km)

APÊNDICE B



APÊNDICE C Mapa LISA Univariado e Bivariado e distribuição de tipos de setor por regime espacial (12 x 12 km)



Mapa LISA Univariado e Bivariado e distribuição de tipos de setor por regime espacial (24 x 24 km)

APÊNDICE D