



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
Centro de Ciências Biológicas e da Saúde  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS AMBIENTAIS – DCAm  
CURSO DE BACHARELADO EM GESTÃO E ANÁLISE AMBIENTAL  
Rod. Washington Luís, Km. 235 – Cx. Postal. 676  
CEP: 13565-905 – São Carlos – SP – Fone: (016) 3351-9776



## **AVALIAÇÃO DE ESTIMATIVAS POPULACIONAIS COM DADOS DE LUZ NOTURNA VIIRS DNB**

Aluna: Rana Barbara Silveira Xavier

Orientador: Vandoir Bourscheidt

**SÃO CARLOS - SP**  
**2022**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE**  
**DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS AMBIENTAIS**  
**CURSO DE BACHARELADO EM GESTÃO E ANÁLISE AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DE ESTIMATIVAS POPULACIONAIS COM DADOS DE LUZ NOTURNA VIIRS DNB**

**Aluna: Rana Barbara Silveira Xavier**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Ciências Ambientais da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Gestão e Análise Ambiental.

Orientador: Vandoir Bourscheidt

**SÃO CARLOS-SP**  
**2022**

# **AVALIAÇÃO DE ESTIMATIVAS POPULACIONAIS COM DADOS DE LUZ NOTURNA VIIRS DNB**

**RANA BARBARA SILVEIRA XAVIER**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado em 13 de julho de 2022 ao Departamento de Ciências Ambientais da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Gestão e Análise Ambiental.

.....

Vandoir Bourscheidt

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe, Maria Ilza, por tudo que fez e tem feito por mim, por todo apoio e amor incondicional e por todo sacrifício para eu chegar até aqui. Você sempre será minha maior inspiração e orgulho. Te amarei para sempre.

Ao meu irmão, Ruan, por mostrar ser possível ingressar em uma universidade pública, agradeço também por todo seu apoio genuíno durante toda a minha graduação e por ser o melhor irmão que poderia ter. Te amo, mano.

Ao meu companheiro de vida, Eduardo, por compartilhar a vida e essa jornada comigo. Por seu apoio incondicional a todo momento, por sua confiança em mim e em meu potencial. Agradeço por todo o tempo que passamos juntos (e aos que ainda estão por vir). Minha vida ficou mais colorida depois que você chegou. Amo você, meu bem.

Ao meu pai, Adenilson, pelo apoio, incentivo e carinho de sempre. Pelo seu otimismo e desejo de uma vida melhor para seus filhos. Te amo pai.

À Maria Salete e ao Lino, pessoas que mesmo de longe, sempre se fizeram presentes. Agradeço pela preocupação e por todo apoio, e pela família que nos tornamos. Amo vocês.

A minha querida amiga e companheira de graduação, Vitória, que caminhou lado a lado comigo nessa trajetória e a tornou mais divertida e leve. Obrigada por tudo, tenho muita sorte em ter te conhecido, amo você.

Ao meu professor e orientador, Vandoir, por ser um excelente profissional, pela orientação e pela paciência. Posso dizer, que não poderia ter escolhido um orientador melhor. Muito obrigada.

## RESUMO

As projeções populacionais do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) servem de base para estudos, planejamentos e monitoramentos urbanos. Nesse sentido é imprescindível que se aproximem ao máximo da realidade, que passa constantemente por mudanças. Para isso, são necessárias revisões periódicas nos métodos utilizados para manter a qualidade dos dados. Por outro lado, essas mudanças urbanas constantes evidenciam a necessidade de novas fontes de dados além das projeções populacionais convencionais, sendo que o sensoriamento remoto noturno demonstra potencial para suprir essa demanda. Utilizando o instrumento *Visible Infrared/ Imaging Radiometer Suite* (VIIRS) *Day/ Night Band* (DNB) operado pelo programa *Defense Meteorological Satellite Program* (DMSP) da NASA (Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço), é possível utilizar o produto gerado por ele - *VIIRS Nighttime Lights* (VNL) - de diferentes formas, sendo que geralmente são aplicados em estudos urbanos em conjunto com dados da superfície terrestre e dados populacionais censitários. Em vista disso, este trabalho propõe realizar uma análise da relação entre composições de luz noturna do instrumento VIIRS e as estimativas populacionais do IBGE no período de 2014 a 2020. Para sua realização, a metodologia aplicada envolveu o uso de dados de estimativas populacionais dos anos de interesse em conjunto com as composições VNL, produzindo gráficos de dispersão- regressão linear OLS da relação entre a estimativa da população e a luminosidade para cada ano no Brasil, e regressão linear ponderada WLS para a relação entre as estimativas populacionais e luminosidade nas regiões do Brasil, considerando como peso o tamanho das áreas, buscando identificar se a relação entre os dados se mantém estável ao longo dos anos. Os resultados sugerem uma redução da relação com o passar dos anos, que podem ter sido afetadas, entre outros fatores, (i) pela expansão das áreas (rurais) iluminadas; (ii) pelos impactos da pandemia na luminosidade; bem como (iii) pelo possível distanciamento das estimativas em relação aos totais populacionais reais. Essa análise buscou fornecer subsídios para a adoção desse tipo de dado como um parâmetro complementar nas estimativas populacionais.

Palavras-chave: VIIRS, luminosidade, sensoriamento remoto, estimativas populacionais.

## ABSTRACT

The population projections of the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE) serve as a basis for urban studies, planning and monitoring. In this sense it is essential that they get as close as possible to reality, which is constantly undergoing changes. For this, periodic reviews of the methods used to maintain data quality are necessary. On the other hand, these constant urban changes highlight the need for new data sources in addition to conventional population projections, and nighttime remote sensing demonstrates the potential to meet this demand. Using the Visible Infrared/ Imaging Radiometer Suite (VIIRS) Day/Night Band (DNB) instrument operated by NASA's Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) program, it is possible to use the product generated by it, the VIIRS Nighttime Lights (VNL), in different ways, and are generally applied in urban studies in conjunction with land surface and population census data. In view of this, this work proposes to carry out an analysis of the relationship between night light compositions of the VIIRS instrument and the population estimates of the IBGE in the period from 2014 to 2020. On this sense, the methodology applied involved the use of data from population estimates together with the VNL compositions, producing OLS linear regression-scatter plots of the relationship between the population estimate and the luminosity for each year in Brazil, and WLS weighted linear regression for the regional relationship between the population estimates and luminosity, considering the areas as a weighting factor, seeking to identify whether the relationship between the data remains stable over the years. The results suggest a reduction in the relationship over time, which may be affected, among other factors, (i) by the expansion of illuminated (rural) areas; (ii) the impacts of the pandemic on luminosity; as well as (iii) by the possible distance of the estimates in relation to the real population totals. This analysis sought to provide subsidies for the adoption of this type of data as a complementary parameter in population estimates.

Keywords: VIIRS, luminosity, remote sensing, population estimates.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - A primeira representa imagens dos satélites, Landsat com resolução espacial de 30m, Spot com 10 m e Ikonos com 1 m, de uma porção do lago Paranoá de Brasília .....	15
Figura 2- Comparação entre os produtos gerados pelo DMSP/OLS e pelo VIIRS DNB em Delhi, Índia no mês de novembro de 2012.....	18
Figura 3- Faixa espectral de detecção do instrumento VIIRS e antecessor DMSP, bem como as regiões de emissão das principais fontes luminosas.....	19
Figura 4 - Área de estudo. ....	23
Figura 5 - Fluxograma das etapas utilizadas para as análises. ....	24
Figura 6 - Mapas Diferença de Luminosidade Noturna - VIIRS Nighttime Lights 2014 e 2020. Cores quentes (frias) indicam ganho (perda) de luminosidade. ....	27
Figura 7- Gráficos de dispersão representando a relação entre a luminosidade média e as estimativas populacionais (2014 a 2020). ....	28
Figura 8- Gráficos de Evolução dos valores de R2 para a regressão linear simples (OLS) e ponderada pela área dos municípios (WLS). Os valores refletem o que é demonstrado pelas classes no gráfico de dispersão. ....	29
Figura 9- Gráfico de Regressão Linear Ponderada pela área dos municípios (WLS) na região Sul. ....	30
Figura 10- Gráfico de Regressão Linear Ponderada pela área dos municípios (WLS) na região Sudeste. ....	31
Figura 11- Gráfico de Regressão Linear Ponderada pela área dos municípios (WLS) na região Centro-oeste.....	32
Figura 12- Gráfico de Regressão Linear Ponderada pela área dos municípios (WLS) na região Norte.....	33
Figura 13- Gráfico de Regressão Linear Ponderada pela área dos municípios (WLS) na região Nordeste. ....	34
Figura 14 - Mapa das mudanças (%) no brilho na china durante a pandemia (o brilho em dezembro de 2019 menos o brilho em fevereiro de 2020). ....	38

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	9
2. OBJETIVOS .....	11
2.1. Objetivo Geral .....	11
2.2. Objetivos específicos .....	11
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
3.1. Projeções Populacionais .....	12
3.2. Sensoriamento Remoto .....	13
3.3. Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) .....	16
3.4. Análise de luz noturna para estudos populacionais .....	20
4. METODOLOGIA.....	23
4.1. Área de Estudo.....	23
4.2. Dados utilizados .....	23
4.3. Preparação dos dados e procedimentos .....	24
4.4. Análise estatística .....	25
5. RESULTADOS .....	27
5.1. Análise geral.....	27
5.2. Análise por região .....	29
5.2.1. Região Sul .....	29
5.2.2. Região Sudeste .....	31
5.2.3. Região Centro Oeste.....	32
5.2.4. Região Norte.....	32
5.2.5. Região Nordeste .....	33
6. DISCUSSÃO .....	35
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	40
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	41

## 1. INTRODUÇÃO

As projeções populacionais realizadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) constituem-se em uma importante fonte de dados durante o período intercensitário. Ao gerar estimativas e indicadores demográficos, elas contribuem para a realização de planejamentos e ações conduzidos pelos setores público e privado (IBGE, 2013; BORGES, 2011). Essas estimativas por sua vez, dado às transformações recorrentes nas dinâmicas urbanas e os investimentos dos setores com base em seu uso, necessitam de revisões constantes no método utilizado para sua obtenção, de modo a permitir que se aproximem ao máximo da realidade (IBGE, 2021b).

No que diz respeito ao planejamento conduzido pelos setores, além da utilização das projeções populacionais convencionais, cada vez mais esforços e investimentos são empregados na busca por informações relevantes sobre o urbano, as cidades e suas infraestruturas. Nesse sentido, o sensoriamento remoto tem se mostrado uma ferramenta aliada a essa busca (JENSEN & COWEN, 1999). Com a capacidade de coletar dados multiespectrais, de multiresolução e multitemporais e modificá-los em informações relevantes no entendimento dos processos urbanos, o Sensoriamento Remoto (SR) permite monitorar processos do solo urbano e gerar conjuntos de dados de cobertura de solo (WENG, 2001). Devido a capacidade de manipulação de dados e geração de informações, o SR é tido como uma ferramenta muito versátil. Desse modo, cabe destacar uma de suas diversas maneiras de uso, que é o caso do sensoriamento remoto noturno, criado nos meados da década de 60 essa modalidade tem ganhado cada vez mais notoriedade nos estudos urbanos (FOSTER, 1983).

Responsável pela origem do SR noturno, a Força Aérea dos Estados Unidos da América (EUA), através do DMSP, colocou em órbita o primeiro instrumento capaz de obter composições noturnas, o Sistema Operacional Linescan, em inglês Operational Linescan System (OLS) (NASA, 2003). Em 2011, o DMSP colocou em operação o conjunto radiométrico Infravermelho Visível, em inglês Visible Infrared/Imaging Radiometer Suite (VIIRS) com o sensor Banda Dia/Noite, em inglês Day/ Night Band (DNB), cujo produto gerado, o VIIRS Luzes Noturnas ou Visible Nighttime Lights (VNL) em inglês, é capaz de detectar brilho em assentamentos humanos, cidades de diferentes tamanhos e aglomerados urbanos (ELVIDGE et al., 2017; DÓRIA et al., 2016; LEE et al., 2006).

Li e Zhou (2017) mencionam que os dados gerados pelo SR noturno, geralmente são utilizados em conjunto com informações da superfície terrestre e dados populacionais censitários em estudos urbanos. Diversos estudos partem dessa premissa, como Dória et al., (2016), que avaliaram a capacidade do VNL em gerar informações extras às geradas pelo censo demográfico na região metropolitana de São Paulo, Amaral et al., (2015) que integraram as luzes noturnas e dados de campo para avaliação de ocupação humana na região amazônica e Anazawa et al., (2020) que construíram tipologias de ocupação com o uso de luzes noturnas, dados do censo demográfico e informações das áreas protegidas para detectar presença de população e infraestrutura na Região Metropolitana do Vale do Paraíba e Litoral Norte. Outros vários autores também fizeram uso das luzes noturnas em estudos populacionais, demonstrando a potencialidade desses dados (e.g., AMARAL et al., 2015; ELVIDGE et al., 2017; DÓRIA et al., 2016; LEE et al., 2006).

Com base no exposto, fica evidente que novas fontes de informações se fazem necessárias para auxiliar nas estimativas populacionais que demandam revisões periódicas e melhoria contínua. Uma possível ferramenta que pode auxiliar nesse processo é o Sensoriamento Remoto Noturno, sendo que os dados de Luzes Noturnas obtidas pelo instrumento VIIRS possuem grande potencial para estudos urbanos, porém no Brasil, esses dados são pouco explorados.

Este trabalho justifica-se pelas mudanças constantes que ocorrem nas dinâmicas urbanas, que afetam as estimativas populacionais e criam a necessidade de buscar novas formas de obter informações que contribuam para sua compreensão, bem como planejamento e monitoramento urbano. Nesse sentido, este trabalho pretende analisar a relação entre dados VNL e as estimativas populacionais, buscando responder a seguinte pergunta: de que forma a comparação dos dados VNL anuais e estimativas populacionais do IBGE podem contribuir para a inferência populacional?

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo Geral**

Este trabalho visa analisar a relação entre as composições de luz noturna do instrumento VIIRS e as estimativas populacionais do IBGE no período de 2014 a 2020.

### **2.2. Objetivos específicos**

Entre os objetivos específicos podem se destacar os seguintes:

- Verificar a relação dos produtos VIIRS DNB com estimativas populacionais do Brasil;
- Verificar as variações regionais das relações entre VIIRS e as estimativas populacionais;
- Verificar as possíveis tendências dos produtos VIIRS ao longo dos anos (2014 a 2020);
- Avaliar a capacidade do produto VIIRS em estimar as variações populacionais ao longo dos anos.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. Projeções Populacionais

Segundo o IBGE (2021a), o censo demográfico é a fonte de referência para investigação de informações sobre condições de vida para a população no Brasil. Ele é feito por meio de um questionário aplicado a cada 10 anos, com perguntas gerais e específicas, para a obtenção de informações a respeito do domicílio e dos moradores. O primeiro censo realizado no país ocorreu no ano de 1808, para fins militares com interesse específico em informações para o recrutamento de novos membros para as forças armadas, causando assim, dúvidas a respeito da confiabilidade dos dados. Devido a esse episódio, o recenseamento considerado como o primeiro no país de fato ocorreu em 1872, conhecido como “Censo Geral do Império”, cuja intenção era reunir dados sobre todos os habitantes do império incluindo nacionais, estrangeiros, pessoas livres, pessoas escravizadas, presentes e ausentes no dia 1º de agosto do ano em questão (IBGE, 2021a; OLIVEIRA; SIMÕES, 2005).

No período intercensitário as fontes mais importantes geradas são as projeções populacionais que proporcionam estimativas e indicadores demográficos prospectivos. As projeções populacionais são consideradas um instrumento significativo para a realização de planejamentos por parte de todos os setores de serviço e para o cálculo de indicadores socioeconômicos e demográficos, assim como nas pesquisas em domicílios realizadas pelo IBGE (IBGE, 2013; BORGES, 2011). Além disso, as projeções populacionais servem de base para as estimativas populacionais municipais (IBGE, 2013).

Desde 1973 para calcular as projeções populacionais nacionais por sexo e idade o IBGE utiliza o método das componentes demográficas, que consiste na interação das variáveis demográficas guiadas por uma Coorte de pessoas<sup>1</sup> em um determinado período e seguindo leis de fecundidade, mortalidade e migração. Essas componentes passam por um processo meticuloso para determinar estimativas e projeções de seus níveis e padrões. No ano de 1975 o IBGE passou a publicar projeções populacionais das Unidades de Federação e estimativas para os municípios obtidos através de métodos matemáticos (IBGE, 2013). Segundo Brito et al., (2010), o método utilizado atualmente pelo IBGE para a realização das projeções de Unidades de Federação e Municípios é o AiBi, sendo que “seu suposto básico é que as

---

<sup>1</sup> Coorte “Uma coorte se refere a um grupo de pessoas experimentando um evento particular durante o mesmo período de tempo” (RIOS-NETO; OLIVEIRA, 1999).

populações dos domínios menores constituem uma função linear da população do domínio maior". De modo geral, a seguinte equação é aplicada nas estimativas populacionais, conhecida como Expressão Analítica Método das Componentes Demográficas (IBGE, 2013):

$$P_{(t+n)} = P_{(t)} + B_{(t,t+n)} - D_{(t,t+n)} + I_{(t,t+n)} - E_{(t,t+n)}$$

Onde:  $P(t+n)$  = população no ano  $t+n$ ;  
 $P(t)$  = população no ano  $t$ ;  
 $B(t,t+n)$  = nascimentos ocorridos entre  $t$  e  $t+n$ ;  
 $D(t,t+n)$  = óbitos ocorridos entre  $t$  e  $t+n$ ;  
 $I(t,t+n)$  = imigrantes do período  $t,t+n$ ;  
 $E(t,t+n)$  = emigrantes do período  $t,t+n$ ;  
 $t$  = ano inicial; e  
 $n$  = tamanho do intervalo

A partir dos anos 2000 o IBGE concedeu acesso ao público às projeções populacionais feitas através do método dos componentes demográficos, sendo que essas projeções são revisadas sempre que são realizados os censos, contagem populacional ou alterações em alguma das componentes utilizadas. Essas revisões são necessárias devido às mudanças que ocorrem nas dinâmicas da população, para garantir a confiabilidade dos dados, aquisição de novas informações relevantes e atualização da metodologia utilizada no cálculo (IBGE, 2021b).

Os setores público e privado investem financeiramente na utilização dos dados das projeções em programas e ações, nesse sentido é de extrema importância manter a qualidade e aproximação das estimativas a realidade, pois quando esses requisitos não são atendidos, gastos são feitos desnecessariamente e a população necessitada não obtêm os benefícios que tem direito (BRITO et al., 2010).

### 3.2. Sensoriamento Remoto

O sensoriamento remoto é uma ciência que utiliza técnicas diversas para aquisição de informações referentes a um objeto, fenômeno ou área, de forma a analisar dados obtidos por sensores de energia eletromagnética, manipulados a partir de plataformas espaciais e aéreas que não entram em contato com os objetos de interesse (LILLESAND et al., 2015). Ele surgiu no século passado junto a criação da câmera fotográfica, instrumento este muito utilizado na obtenção de imagens aéreas. Seu primeiro uso foi para um segmento que sempre apostou em novas tecnologias, as Forças Armadas, sendo que as câmaras utilizadas por eles possuíam disparador automático e ajustável e eram acopladas em pombos correios junto a

pequenos rolos de filmes, utilizados para descobrir a posição de inimigos. As imagens geradas por essa estratégia eram de extrema importância para o reconhecimento da área e infraestrutura das forças militares inimigas (FIGUEIREDO, 2005). No começo dos anos 70, quando os satélites de recursos naturais foram lançados, houve uma grande evolução na forma de utilização do sensoriamento remoto, devido principalmente ao fato de que esses equipamentos tinham um bom desempenho em órbita, seja pelo baixo consumo de energia, por conta das elevadas altitudes e questões gravitacionais, como também por fornecer ao longo de sua vida útil, imagens da superfície terrestre coletadas 24 horas do dia (FIGUEIREDO, 2005). Weng (2001) conseguiu resumir o funcionamento e os frutos colhidos através do sensoriamento remoto e a utilização da tecnologia GIS:

“O sensoriamento remoto por satélite coleta dados multiespectrais, de multiresolução e multitemporais, e os transforma em informações valiosas para entender e monitorar os processos do solo urbano e para construir conjuntos de dados de cobertura do solo urbano. A tecnologia GIS fornece um ambiente flexível para inserir, analisar e exibir dados digitais de várias fontes necessários para a identificação de características urbanas, detecção de mudanças e desenvolvimento de banco de dados.”

Dentre os elementos que caracterizam o Sensoriamento Remoto, podem se destacar as suas diferentes resoluções, a constar: espacial, temporal, espectral e radiométrica. A resolução espacial relaciona-se com o sensor e sua capacidade de definição do tamanho do pixel, que por sua vez equivale a menor parcela imageada (Figura 1). Ou seja, o pixel tem seu valor composto por todo o feixe de luz advindo do solo em uma determinada unidade de área, que definirá a sua resolução espacial. O LANDSAT, por exemplo, gera imagens com resolução de 30m, enquanto o NOAA, 1100m. Conforme diminui a dimensão do pixel, maior se torna a resolução espacial da imagem, que facilitará a detecção dos alvos em solo (FIGUEIREDO, 2005).

A escolha da resolução mais apropriada para um determinado estudo normalmente se baseia no nível de autocorrelação dos objetos em solo. Em terrenos naturais o nível de correlação é alto com baixa variação na extensão da área, fazendo com que não seja necessário uma alta resolução espacial. Por outro lado, em áreas com maior variabilidade de

tipos de objetos, como é o caso de áreas urbanas, é necessário um sensor com capacidade de resolução de poucos metros (MENESES & ALMEIDA, 2012).



Figura 1 - A primeira representa imagens dos satélites, Landsat com resolução espacial de 30m, Spot com 10 m e Ikonos com 1 m, de uma porção do lago Paranoá de Brasília. Fonte: MENESES & ALMEIDA, 2012.

A resolução espectral tem a ver com a radiação eletromagnética (REM). A REM é decomposta pelos sensores em faixas espectrais com diferentes larguras, denominadas bandas espectrais. O tamanho dessas faixas influencia na resolução espectral, sendo que: com larguras menores e/ou maiores números de bandas espectrais captadas pelo sensor, maior é a resolução espectral da imagem (FIGUEIREDO, 2005).

A resolução radiométrica leva em consideração a faixa de valores numéricos associados aos pixels, que nada mais é do que a representação numérica da intensidade da radiação obtida pela área terrestre investigada. Essa representação é denominada como nível de cinza do pixel cujo valor depende da quantidade de bits. Como exemplo, podemos citar as imagens LANDSAT que possuem 8 bits ligados que equivalem ao valor 255, por outro lado as imagens NOAA possuem 10 bits e o valor máximo do nível de cinza do pixel é de 1023 (FIGUEIREDO, 2005).

Finalmente, a resolução temporal é relacionada ao tempo decorrido para revisitação do satélite em uma mesma área (FIGUEIREDO, 2005).

Ao decorrer do tempo, houve um aumento expressivo de profissionais e organizações que buscavam por informações relevantes sobre a cidade e sua infraestrutura, para que fossem utilizadas na administração ou em trabalhos com retornos monetários significativos. Pensando nisso, agências federais, estaduais e municipais, realizaram investimentos milionários na obtenção das mais variadas formas de dados extraídos pelo sensoriamento

remoto e fotografias aéreas (JENSEN & COWEN, 1999). Fora o interesse por aspectos urbanos, existem as pesquisas conduzidas para obtenção de informações geográficas e ambientais que geralmente usam mapas. Esses mapas podem ser confeccionados com base na espacialização de dados censitários, coleta de dados em campo, informações extraídas em cartas ou por imagens de satélites de recursos terrestres, tais como o LANDSAT e o CBERS usados em escala regional.

Além disso, é possível utilizar também satélites de alta resolução espacial como o IKONOS e o QUICKBIRD que permitem detalhamento em escala local, como por exemplo mapeamento dentro de municípios (MARQUES, 2006). O LANDSAT se destaca entre os mencionados, pois é um dos mais utilizados para informações ambientais, como monitoramento da qualidade da água, aspectos associados às geleiras, aspectos ecológicos como espécies invasoras, monitoramento dos recifes de coral, aspectos de uso e cobertura do solo e desmatamento, mas também é capaz de ser utilizado em estudos sobre crescimento populacional (NASA, 2022).

Outra forma de sensoriamento remoto se refere ao sensoriamento remoto noturno, que vem se destacando e conseguindo cada vez mais investimentos. Desenvolvido nos meados dos anos 60, ele consiste basicamente em sensores ópticos de imagem noturna que operam no espectro eletromagnético do infravermelho e microondas (FOSTER, 1983). Geralmente esses dados são mais utilizados em conjunto com informações da superfície terrestre e com dados populacionais censitários para o mapeamento de extensão urbana (LI & ZHOU, 2017).

### **3.3. Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS)**

A Força Aérea dos EUA na década de 60, criou o *Defense Meteorological Satellite Program* (DMSP), responsável pelo primeiro instrumento capaz de obter imagens noturnas, o *Operational Linescan System* (OLS). Nesse período, o programa enviou diversas naves espaciais, ajustadas aproximadamente em 99 graus de inclinação e 800 km de altitude, para sondar aspectos da Terra (NASA, 2003). O OLS é capaz de obter imagens noturnas e diurnas, funcionando como um radiômetro de varredura oscilatória, sendo que este instrumento detecta emissões de infravermelho próximos visíveis (VNIR) de cidades e operam em duas bandas espectrais, a VIS e TIR. Há um tubo fotomultiplicador (PMT) utilizado no processo para identificar fontes fracas de irradiação de VNIR que opera como um otimizador do sinal da

banda VIS. Além disso, o PMT é capaz de captar nuvens no período noturno devido a intensificação gerada por ele, sendo capaz também de intensificar luzes noturnas nas cidades (ELVIDGE, 1997; ELVIDGE, 2001).

Em 2011, o DMSP colocou em operação o instrumento *Visible Infrared/ Imaging Radiometer Suite* (VIIRS), criado em parceria com a NASA e a National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) e composto por 22 bandas espectrais, incluindo a Day/ Night Band (DNB), visando substituir/aprimorar instrumentos já existentes: o OLS, o Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) e o Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR). O VIIRS foi pensado para capturar imagens diurnas e noturnas terrestres com resolução espacial de 500 metros, sendo que cada imagem percorre cerca de 3.000 km de extensão da superfície terrestre, gerando novas possibilidades para estudos populacionais (ELVIDGE et al., 2017; DÓRIA et al., 2016; LEE et al., 2006).

Os sensores OLS e VIIRS apresentam algumas semelhanças tais como, mesma varredura e passagens de banda de imagem de baixa luminosidade. Por outro lado, divergem no que diz respeito ao horário de passagem, pico de iluminação e outras variáveis, mais bem detalhadas no Quadro 1, que contém a comparação das características primárias entre os sensores OLS e VIIRS.

O VIIRS supera o OLS em termos de resolução espacial e radiométrica, possuindo resolução espacial de 375 e 750 metros (a depender da banda), resolução temporária em dias, cobertura mundial e dados com maior nível de qualidade. Além disso, segundo Shi et al. (2014), o produto mais recente VIIRS DNB tem resultados superiores aos gerados pelo DMSP OLS para mapeamento de extensões urbanas. Na Figura 2 é possível observar a comparação entre os produtos gerados pelos instrumentos OLS e VIIRS DNB.

O *VIIRS Nighttime Lights* (VNL) é um produto gerado pelo instrumento que tem a capacidade de indicar o brilho em assentamentos humanos, cidades de diferentes tamanhos e aglomerados urbanos (ELVIDGE et al., 2017). A Figura 3 ilustra a faixa espectral de detecção do VIIRS em relação às principais fontes luminosas e outros equipamentos que detectam a radiação na região do visível.

Quadro 1- Comparação entre os sensores OLS e VIIRS (em inglês)

Variável	DMSP-OLS	SNPP-VIIRS
Operador/construtor	Força Aérea Americana	parceria NASA – NOAA (JPSS)
Orbita	Polar — 850 km, inclinação de 98.8°, 102 minutos	Polar – 827 km, inclinação de 98.7°, 102 minutos
Largura de faixa	3000 km	3000 km
Passagem noturna	~19:30	~01:30
Low light imaging bandpass	PAN 0.5 to 0.9 um	PAN 0.5 to 0.9 um
Resolução espacial	5 km x 5 km at nadir	742 x 742 m
Bandas espectrais adicionais	IV termal (10 um)	21 bandas entre 0.4 to 13 um.
Res. Radiométrica	6 bit	14 bit
Saturação	Comum em áreas urbanas	Sem saturação
Low light imaging detection limit	~5E-10 Watts/cm2/sr	~2E-11 Watts/cm2/sr
Calibração	Inexistente para banda de baixa luminosidade	Difusor solar usado para calibrar dados DNB, calibração estendida para modo de imageamento de baixa luminosidade
Futuro/continuidade	Os dois últimos satélites voarão em órbitas de amanhecer/ crepúsculo	JPSS está construindo segundo VIIRS, com planos para o terceiro. Ambos voarão em orbitas pós-meia-noite

Fonte: ELVIDGE et al., 2013.

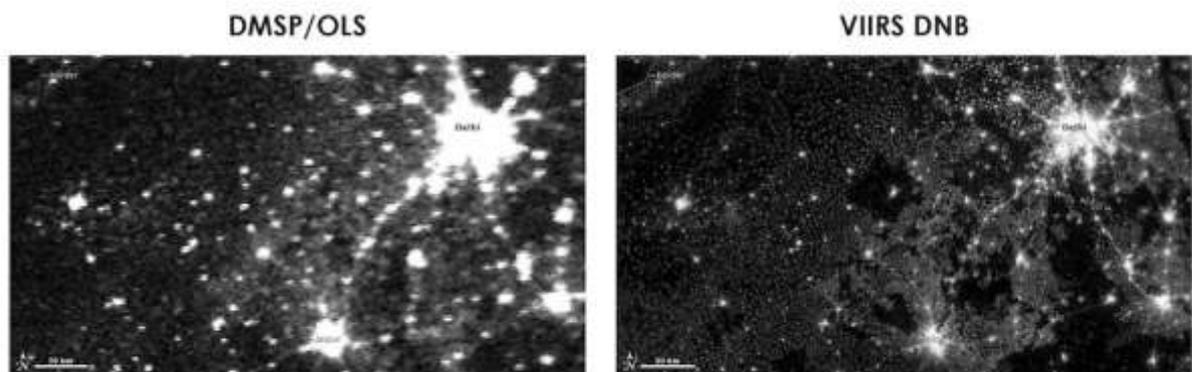


Figura 2- Comparação entre os produtos gerados pelo DMSP/OLS e pelo VIIRS DNB em Delhi, India no mês de novembro de 2012. Fonte: NASA, 2022.

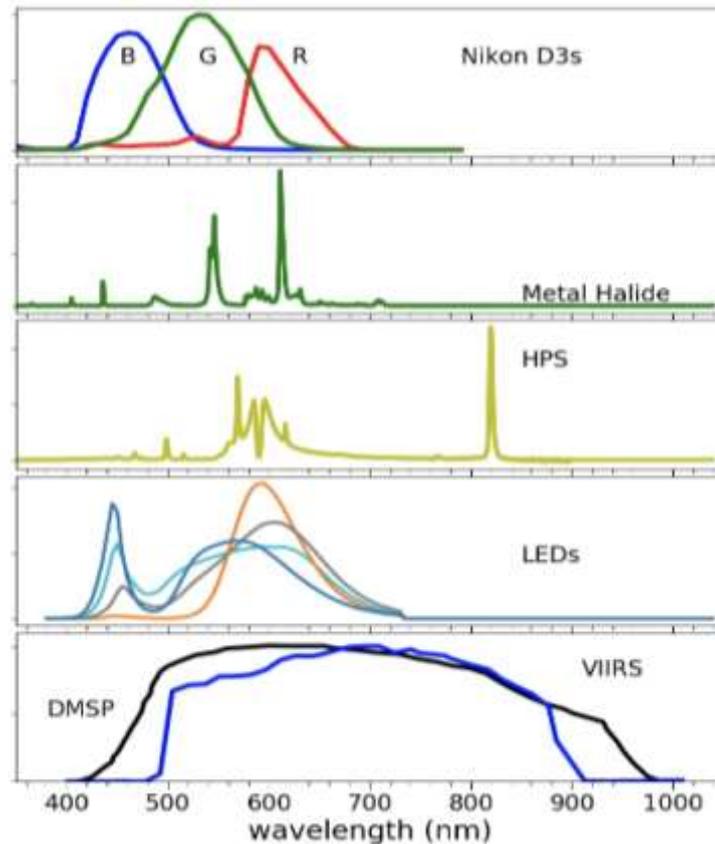


Figura 3- Faixa espectral de detecção do instrumento VIIRS e antecessor DMSP, bem como as regiões de emissão das principais fontes luminosas. Fonte: Levin et al., 2020.

Os primeiros dados noturnos globais anuais, chamados de V.1, foram produzidos pela EOG (*Earth Observation Group*) utilizando os anos de 2015 e 2016 de dados noturnos VIIRS. Após isso, surge o V.2 anual, que até o presente momento, é o conjunto de dados anuais VIIRS mais recente, englobando os anos de 2012 a 2020 (ELVIDGE, 2021; EOG, 2021). Esses dados passam por uma série de processamentos, que envolvem a aplicação de diferentes métodos. Os dois conjuntos passam por uma filtragem inicial para remoção de pixels iluminados pelo sol, lua e com nuvens, evidenciando luzes, incêndios, fenômenos de aurora e fundo. Na V.1 os produtos são gerados a partir de um ano de dados noturnos de DNB, ao contrário do V.2 que gera as composições mensais, que por sua vez são combinadas para formação das composições anuais. Um dos métodos empregados no processamento dos dados V.1 envolve o descarte de pixels de queima de biomassa e isolamento do fundo, feito a partir da remoção de outliers em histogramas produzidos a cada célula de grade de 15" de arco, sendo outliers de alto e baixo brilho removidos até que o desvio padrão do histograma seja estabilizado.

Em 2019 a NASA lançou o produto de luzes noturnas Black Marble (VNP46A1). A resolução espacial deste produto equivale a 500 metros, além de prover medidas de radiância livre de nuvens, e com correções atmosféricas, de terreno, vegetação, neve, lunar e de dispersão para estimar as luzes noturnas diárias (NTL). Conforme descrito por Román et al. (2018), o processamento dos dados inclui a correção atmosférica através de modelos de transferência radioativa, e a correção para efeitos de refletância bidirecional. A correção atmosférica mitiga os erros decorrentes provenientes de recuperações de topo de atmosfera de baixa qualidade, especialmente entre regiões com cargas pesadas de aerossol e em geometrias Lua/sensor produzindo contribuições de dispersão direta mais fortes. Na correção para efeitos bidirecionais, o algoritmo VNP46 considera estimativas da luz real da lua, aerossol e a contribuição do albedo da superfície através de inversão lítica do modelo BRDF. Este modelo tem se mostrado eficaz em remover vieses introduzidos por fontes estranhas de noite emissões de luzes (ROMÁN et al., 2018).

A escolha dos produtos VNL ao VNP46A1 neste trabalho deu-se pela cobertura temporal dos dados utilizada na análise. Enquanto os dados VNL compreendem dados de 2014 a 2021, o VNP46A1 engloba dados a partir de 2019.

Esses dados gerados pelo imageamento noturno abrem novas oportunidades de pesquisa, como por exemplo em Ma et al. (2012), onde os autores discorrem sobre a eficiência e a crescente utilização das luzes noturnas em pesquisas de assentamentos urbanos, como em casos de investigação sobre expansão urbana e desenvolvimento urbano, além disso, eles demonstram que essas luzes podem ser investigadas em séries temporais de área de iluminação ponderada e medidas estatísticas urbanas.

### **3.4. Análise de luz noturna para estudos populacionais**

À noite, as emissões de luzes artificiais costumam ser mais brilhantes do que as luzes naturais e celestiais refletidas, fazendo com que as atividades humanas sejam evidenciadas ainda mais do que durante o período diurno, particularmente em áreas urbanas. Durante o último século os avanços na intensidade e espectros da luz artificial à noite, permitiram gerar imagens com potencial para detectar e investigar as mudanças globais (KYBA et al., 2014).

Os dados de luzes noturnas vêm servindo de base para diversos estudos populacionais com diferentes objetivos. Alguns estudos empregaram as luzes noturnas obtidas através do

instrumento VIIRS, como por exemplo Dória et al. (2016), que realizaram uma avaliação para determinar a capacidade das luzes noturnas do instrumento VIIRS em gerar informações adicionais às geradas pelo censo demográfico através de sua aplicação na região metropolitana de São Paulo. A avaliação consistia em utilizar os dados e aplicar regressão linear simples e posteriormente regressão espacial de modo a estimar o volume e distribuição da população na área de interesse. Como conclusão determinaram a viabilidade do uso de dados de luzes noturnas em escalas locais e sua contribuição para estimativas populacionais.

Outro caso é o estudo realizado por Amaral et al., (2015), que utilizaram as luzes noturnas integradas a dados obtidos em campo, para avaliar o potencial bem como limitações quanto ao uso das mesmas em estudos de ocupação humana na região Amazônica, sendo a conclusão, o reconhecimento da capacidade de uso das luzes noturnas VIIRS para detecção de atividades humanas na área de estudo.

Anazawa et al., (2020), com o objetivo de detectar a presença de população e infraestrutura na Região Metropolitana do Vale do Paraíba e Litoral Norte em áreas protegidas por lei, construíram tipologias de ocupação utilizando luzes noturnas, dados do Censo Demográfico e informações das áreas protegidas para realizar as análises necessárias no estudo. Os resultados indicaram que a utilização de novas fontes de dados, como as luzes noturnas, é um grande aliado aos estudos populacionais.

Para além do uso das composições de luzes noturnas obtidas pelo instrumento VIIRS, outros estudos utilizaram o Operational Linescan System (OLS), como é o caso de Ch et al., (2018) que, através de imagens de alta resolução de luzes noturnas, criaram uma medida capaz de ser utilizada mundialmente para comparar o tamanho de áreas metropolitanas espalhadas pelo mundo. Utilizando metodologias para corrigir e adaptar os erros e falhas associadas aos dados, foi possível gerar uma medida qualificada para determinar a densidade populacional das cidades ao redor do mundo.

Li et al., (2016), exploraram o potencial das luzes noturnas ajustadas aos dados de Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) para verificar extensão e dinâmicas urbanas em escala global e regional. Por meio dos métodos de Mann-Kendall e regressão linear os autores realizaram uma comparação temporal e obtiveram resultados que apoiaram o uso das luzes noturnas para estudos de caracterização da dinâmica espaço temporal da extensão urbana em escala regional.

Düben e Krause (2021), para avaliar novas formas de compreensão sobre a distribuição do tamanho das cidades de todo o mundo, compararam dados de distribuição populacional e distribuição econômica utilizando luzes noturnas. A utilização dos dados de LN permitiu inferir diversos aspectos a respeito da distribuição do tamanho das cidades e dinâmicas urbanas.

Ma et al., (2016) criaram um índice de luminosidade artificial da velocidade de urbanização, adquirido através de luzes noturnas, a fim de obter o ritmo de urbanização e alterações na cobertura do solo ao decorrer do tempo. Os resultados demonstraram que as LN são ferramentas importantes que permitem o fornecimento de percepções acerca da urbanização na área de estudo, bem como mudanças no uso e cobertura do solo e outras informações ambientais relevantes.

Fan et al., (2017) através de dados de luzes noturnas estimaram alterações nos padrões espaciais em cidades da província de Shandong ao longo de 1994 a 2012, demonstrando o potencial desses dados nos estudos urbanos.

Todos esses estudos corroboram com a ideia de que as composições de luzes noturnas possuem grande potencial em investigações urbanas.

## 4. METODOLOGIA

### 4.1. Área de Estudo

A área de estudo corresponde ao território brasileiro (Figura 4). É o maior país da América do Sul com um PIB de US \$1.846.796 e uma população de 212.559.409 habitantes. Possui extensão territorial de 8.510.345,538 km<sup>2</sup>, idioma oficial Português-BR e a moeda oficial é o real (IBGE PAÍSES, 2021).



### 4.2. Dados utilizados

Para realizar os procedimentos foram utilizados os produtos VIIRS Luzes Noturnas (VLN) das médias anuais da coleção v20 dos anos de 2014 a 2020 disponíveis na plataforma Earth Observation Group ([https://eogdata.mines.edu/nighttime\\_light/](https://eogdata.mines.edu/nighttime_light/)). Juntamente com os dados VLN, foram obtidos dados vetoriais dos limites municipais e das unidades da federação disponibilizados pelo IBGE, bem como as estimativas populacionais dos anos de 2014 a 2020, disponibilizados pelo mesmo instituto.

### 4.3. Preparação dos dados e procedimentos

O Fluxograma da Figura 5 ilustra as etapas metodológicas. Todos os procedimentos descritos a seguir foram realizados para todo o período de interesse (2014 a 2020), utilizando as composições de luz noturna anuais e as estimativas populacionais do IBGE para os mesmos anos.

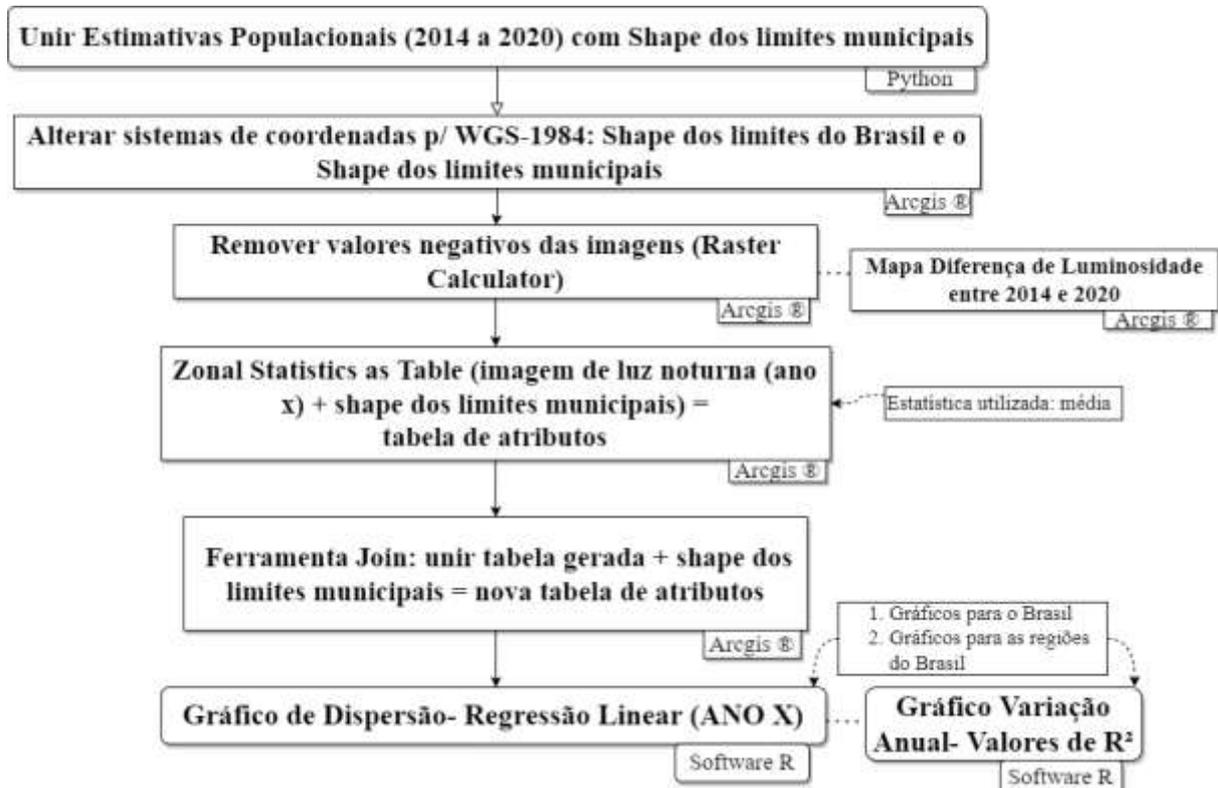


Figura 5 - Fluxograma das etapas utilizadas para as análises. Fonte: Autoria própria.

Primeiramente, foi feita a união das informações das estimativas populacionais disponíveis em planilhas ao shapefile dos limites municipais. Esse procedimento foi feito utilizando a linguagem Python.

Utilizando o software Arcgis® foi feita a alteração do sistema de coordenadas do shape dos limites do Brasil e o shape dos limites municipais para WGS-1984 para coincidir com os dos produtos VLN. A composição de cada ano foi recortada sobre o shape do Brasil. Em seguida, pixels com valores de luz noturna inconsistentes (radiância  $\leq 0$ ) foram filtrados. Feito isso, foi realizado a diferença de luminosidade noturna dos anos de 2014 e 2020 no Brasil, através da ferramenta Raster Calculator no software Arcgis®, para a geração de um mapa de identificação visual. Com as composições já filtradas, foi ainda aplicada a ferramenta Zonal Statistics as Table para resumir os dados estatísticos referentes a composição de luz noturna

dentro dos limites do shape da estimativa populacional por município, gerando uma tabela unindo a luminosidade às informações de estimativa populacional no Brasil. Como resultado, foi gerada uma tabela com todas as informações de interesse, que foi então utilizada para realizar a análise de regressão (linear simples e ponderada) entre as variáveis população e luminosidade do ano de interesse, bem como para as regiões do Brasil. Para a realização da regressão linear, tanto simples quanto ponderada, foi utilizado o software R.

#### 4.4. Análise estatística

Utilizada em diversas áreas de pesquisa, a Regressão Linear Simples ou OLS (Ordinary Least Square) é uma técnica que, de modo geral, busca entender qual a influência entre uma variável explicativa X sobre o valor esperado de uma variável resposta Y. Nesse método, o investigador pretende verificar a relação de somente uma variável explicativa com a variável resposta usando como base a técnica de Mínimos Quadrados. O modelo matemático nesse caso considera que a variável Y independente e a X dependente, estejam relacionadas, de forma a ser possível encontrar e analisar como o valor esperado da variável resposta  $E[Y]$  é influenciado frente às mudanças nas condições que se relacionam com a variável Y. A variável X, denominada explicativa, tem por função proporcionar informação sobre o comportamento da variável resposta, Y. A equação linear da Regressão Linear Simples é definida como (SILVA, 2016):

$$E[Y_i] = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i$$

Onde:  $\beta_0$  é o intercepto ou coeficiente linear e que diz respeito à ordenada na origem da representação gráfica do modelo linear;  $\beta_1$  é o coeficiente de regressão ou angular representando o declive da reta associada ao modelo linear; O índice i indica cada observação com  $i=1,2,\dots,n$ ;  $X_i$  são as n observações da variável explicativa;  $\varepsilon_i$  representa o desvio entre cada observação real  $Y_i$  e respectivos valores estimados pelo modelo  $E[Y_i]$ . Os erros  $\varepsilon_i$  possuem valor médio zero e variância  $\sigma^2$ . A distribuição de  $\varepsilon_i$  é tida como Normal e geralmente representada na forma  $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$

A Regressão Linear Ponderada ou Weighted Least Squares (WLS), por outro lado, é um método de regressão onde os resíduos são heterocedásticos, diferente do método OLS que os resíduos são homocedásticos. Basicamente, o método consiste em atribuir a cada

observação um peso referente a incerteza da mesma. Nesse caso há um ajustamento de informações. A equação referente a regressão WLS é denominada (ABDI et al., 2007):

$$\mathcal{E}_w = \sum_i w_i (Y_i - \hat{Y}_i)^2 = \sum_i w_i [Y_i - (a + bX_i)]^2$$

Onde:  $w_i$  é o peso ( $w$ ) atribuído a observação ( $i$ );  $Y_i$  e  $X_i$  são as observações;  $a$  e  $b$  são a intersecção e inclinação da linha de regressão respectivamente.

Para ambos os métodos, uma das melhores formas de se avaliar o resultado observado é através do Coeficiente de Determinação, comumente denominado como  $R^2$ . Este coeficiente se baseia na análise de variância da regressão, permitindo verificar quão ajustado é o modelo para descrever a situação investigada. O  $R^2$  é obtido através da equação (SILVA, 2016):

$$R^2 = \frac{SQR}{SQT}$$

Onde SQR é a Soma de Quadrados de Regressão e SQT é a Soma de Quadrados Total.

O valor do coeficiente de determinação varia de 0 a 1, sendo que quanto mais próximo de 1, melhor é o ajuste do modelo para descrever a situação investigada. Além disso, o  $R^2$  fornece a proporção da variação de  $Y$  que é explicada pela regressão (SILVA, 2016).

No presente estudo, inicialmente utilizou-se a Regressão Linear Simples (OLS) para abordar a área de estudo, considerando as variáveis Luminosidade Ponderada em escala Log e as áreas dos municípios para cada ano e região do período de análise. Em seguida, para uma avaliação mais detalhada optou-se por utilizar a Regressão WLS por regiões, sendo consideradas as variáveis Luminosidade Ponderada em escala Log e as áreas dos municípios para cada ano do período de análise, além dos pesos atribuídos com base no tamanho dos municípios, divididos em três classes: pequenos, médios e grandes. Para a realização das análises estatísticas foi utilizado o software R.

Os coeficientes obtidos tanto para a regressão linear quanto para a regressão ponderada (WLS) foram avaliados de forma temporal no sentido de identificar possíveis variações na relação entre os dados ao longo dos anos.

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Análise geral

É possível observar na Figura 6 o mapa da diferença de luminosidade noturna entre os anos de 2014 e 2020. É possível observar as áreas que apresentaram aumento na luminosidade (cores quentes) e áreas com redução dos valores, indicando perda de luminosidade (cores frias). Cabe destacar que os vazios no mapa representam áreas que apresentaram valores inconsistentes na composição de 2014 ou de 2020, de forma que os pixels para esses casos foram desprezados (considerados como nulos).

### Diferença de Luminosidade Noturna - VIIRS Nighttime Light 2014-2020

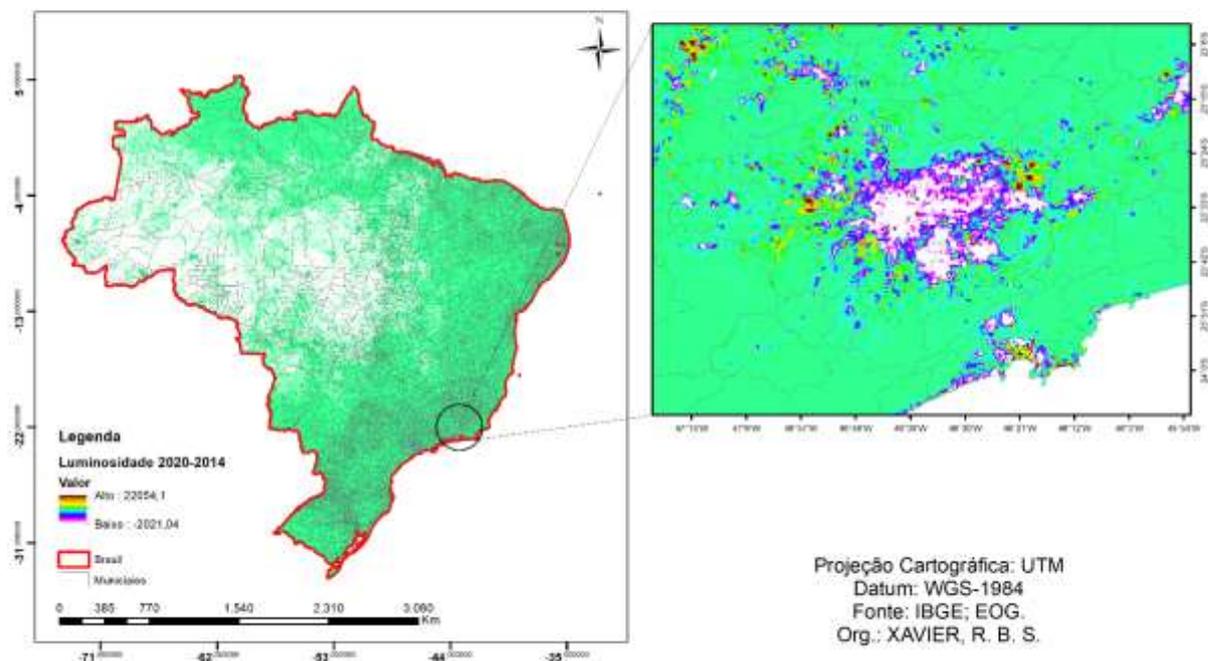


Figura 6 - Mapas Diferença de Luminosidade Noturna - VIIRS Nighttime Lights 2014 e 2020. Cores quentes (frias) indicam ganho (perda) de luminosidade. Fonte: Autoria própria, 2022.

Gráficos de dispersão anuais são apresentados na Figura 7, utilizando escala Log-Log. Esses gráficos indicam a relação entre a luminosidade média e as estimativas populacionais, que pode ser considerada boa. Observa-se, no entanto, variações consideráveis na relação entre as duas variáveis conforme aumenta a área dos municípios, conforme observado pelas diferentes cores/classes. As classes sugerem que a área dos municípios é um fator importante nos ajustes, com as grandes áreas municipais se afastando da linha de ajuste principal. Essa

variável foi usada como peso na regressão WLS, melhorando significativamente os ajustes obtidos. Vale destacar ainda que as variações entre os dados parecem diminuir conforme a população e a luminosidade aumentam, ou seja, os resíduos tendem a ser menores para os valores maiores, sugerindo a presença de heterocedasticidade nos dados.

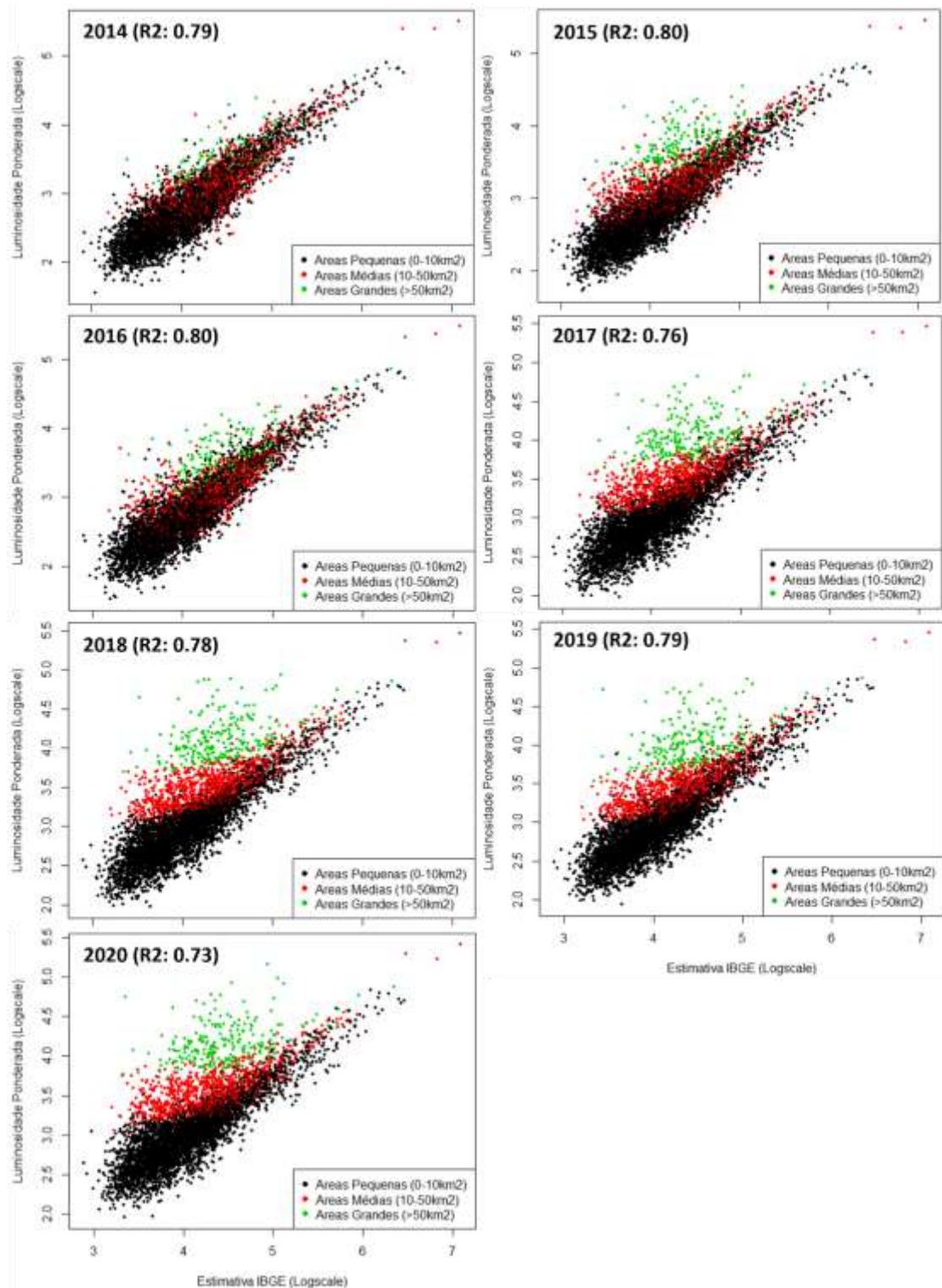


Figura 7- Gráficos de dispersão representando a relação entre a luminosidade média e as estimativas populacionais (2014 a 2020). Fonte: Autoria própria, 2022.

Já a Figura 8 resume os resultados dos gráficos de dispersão através dos coeficientes obtidos para a regressão linear de forma temporal, permitindo identificar as variações ao longo dos anos. Os valores de  $R^2$ , para este caso, se referem tanto para o ajuste do modelo linear simples quanto para o modelo ponderado pela área dos municípios. A inclusão da área dos municípios através da regressão WLS melhora consideravelmente o coeficiente de determinação. Apesar disso, percebe-se uma queda dos valores de  $R^2$  no decorrer do período analisado, tanto para o modelo OLS quanto para o WLS.

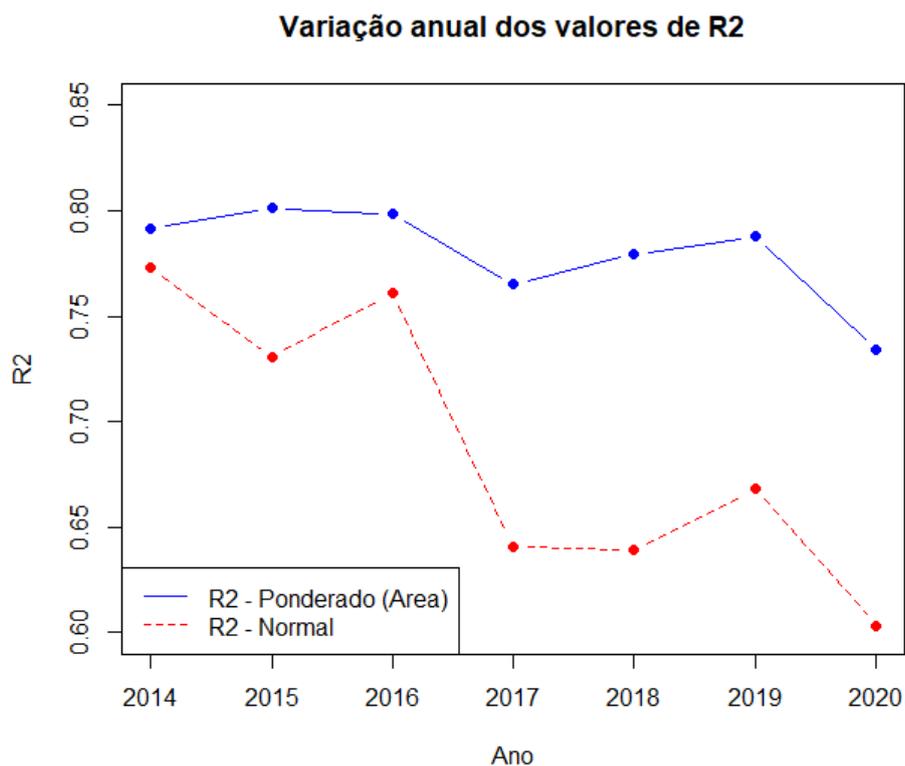


Figura 8- Gráficos de Evolução dos valores de  $R^2$  para a regressão linear simples (OLS) e ponderada pela área dos municípios (WLS). Os valores refletem o que é demonstrado pelas classes no gráfico de dispersão. Fonte: Autoria própria, 2022.

## 5.2. Análise por região

Buscando entender melhor as relações e os impactos da área observados nas figuras anteriores, foi realizada a análise por regiões, que é apresentada a seguir.

### 5.2.1. Região Sul

Através da Figura 10, é possível observar, para esta região, que a correlação dos dados é forte e positiva, observada com altos valores de  $R^2$ . Outra observação é que, de forma similar a Figura 10, a luminosidade mínima dos municípios com maior área tende a ser superior à dos

municípios com área menor. Ao mesmo tempo, a variação entre a luminosidade e a estimativa populacional parece ser maior nesses casos, implicando em maiores erros. Ainda na Figura 9, o gráfico de evolução dos valores de  $R^2$  indica que os valores dos coeficientes se mantêm relativamente próximos. Os anos de 2016 e 2019 apresentaram o menor (0.83) e maior valor (0.87), respectivamente. Algo que desperta a atenção, é que após 2016, ano em que o coeficiente apresentou menor valor, os anos sucessores demonstravam uma tendência de elevação, que é revertida no ano de 2020, quando houve uma queda no  $R^2$ , chegando a 0.85.

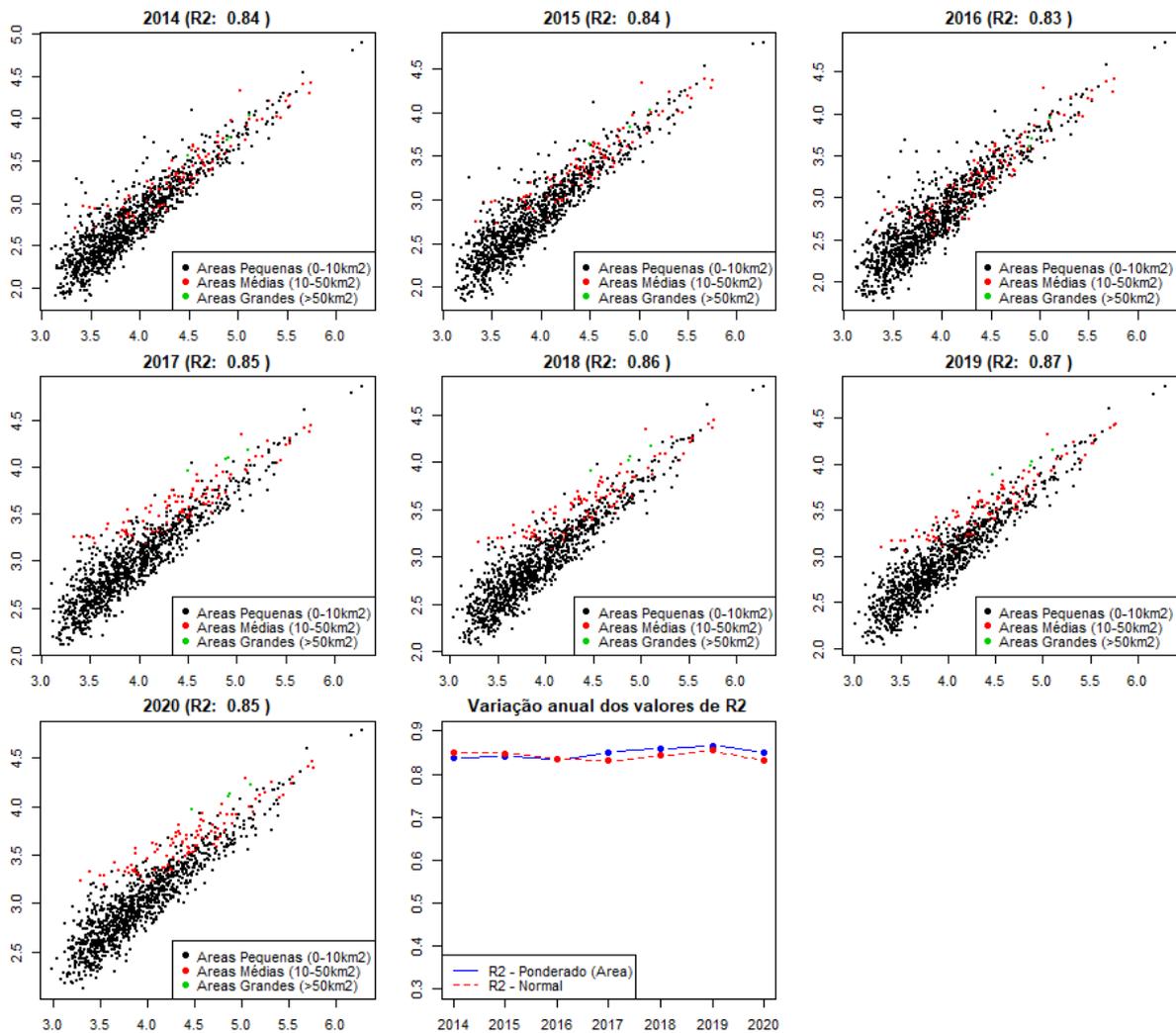


Figura 9- Gráfico de Regressão Linear Ponderada pela área dos municípios (WLS) na região Sul. Fonte: Autoria própria, 2022.

De modo geral, a partir dos gráficos gerados, percebe-se que o modelo explica bem a variabilidade dos dados, visto que em todos os anos do período analisado, os valores de  $R^2$  foram iguais ou superiores a 0.83.

### 5.2.2. Região Sudeste

A Figura 10 demonstra que a disposição dos dados indica que a correlação dos dados é forte e positiva. Nessa região também fica mais evidente a maior separação entre as classes de tamanho na relação entre luminosidade e população, sugerindo um maior impacto da área com o passar dos anos. Também é possível observar o gráfico de evolução dos valores de  $R^2$ , que por sua vez indica que os valores dos coeficientes se mantêm relativamente próximos (variação de  $0.80 \sim 0.86$ ). Os anos de 2020 e 2014 apresentaram o menor ( $0.80$ ) e maior valor ( $0.86$ ), respectivamente.

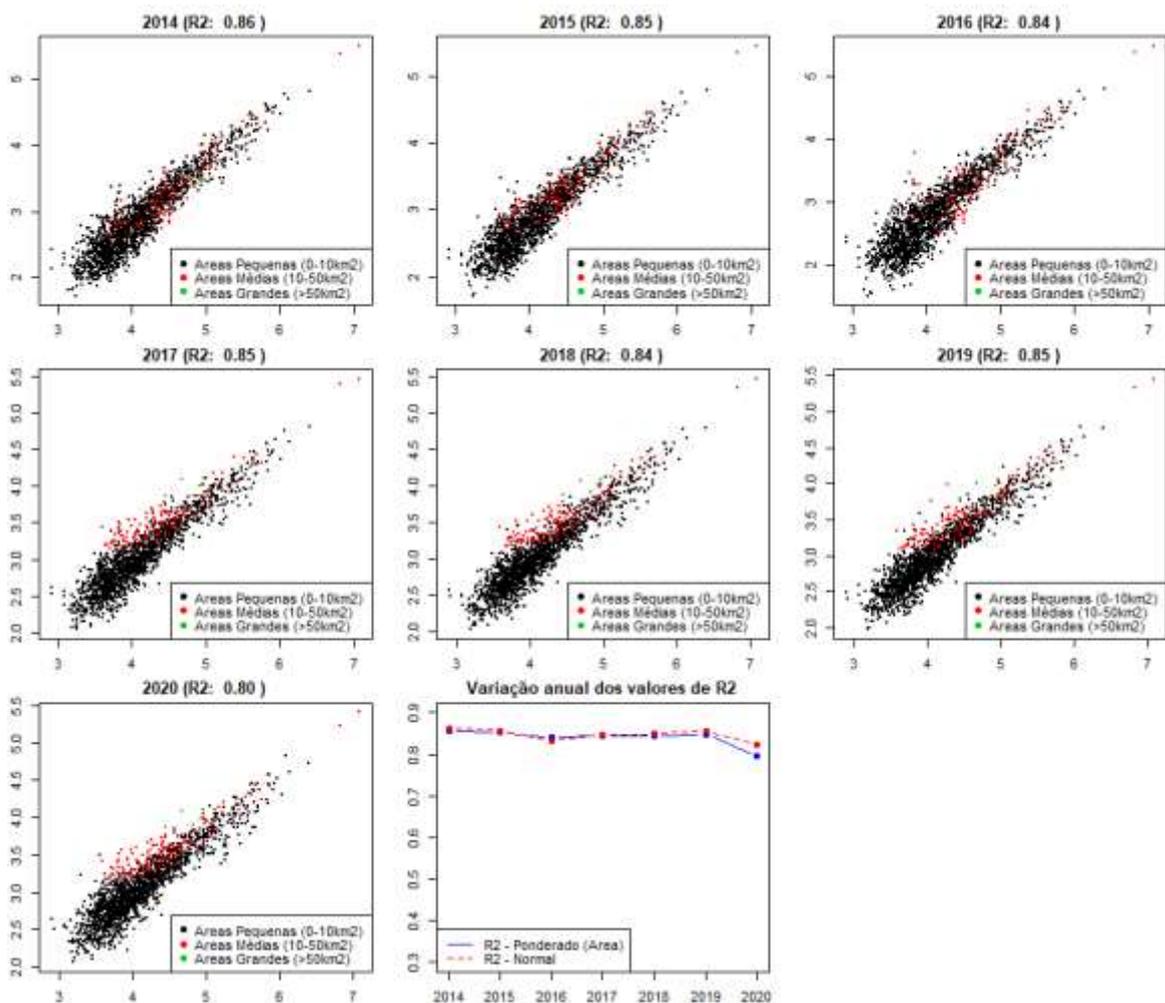


Figura 10- Gráfico de Regressão Linear Ponderada pela área dos municípios (WLS) na região Sudeste. Fonte: Autoria própria, 2022.

Nota-se que em 2020 novamente há uma queda súbita no  $R^2$ , chegando a  $0.80$ , valor bem discrepante dos demais ( $0.84 \sim 0.86$ ) e abaixo da média do período ( $\cong 0.84$ ). Os gráficos de modo geral sugerem que o modelo explica bem a variabilidade dos dados, visto que em todos os anos do período analisado, o valor de  $R^2$  foi igual ou superior a  $0.80$ .

### 5.2.3. Região Centro Oeste

Os gráficos de dispersão da região Centro Oeste (Figura 11) sugerem, no que diz respeito à distribuição de dados, que a correlação não é tão forte se comparada a região sul e sudeste, porém positiva. O gráfico de evolução dos valores de  $R^2$ , indica que os valores dos coeficientes se mantêm próximos, porém variam mais que as regiões anteriores (variação de  $0.69 \sim 0.80$ ). O ano de 2020 apresentou o menor  $R^2$  (0.69), enquanto os anos de 2015 e 2016 o maior valor (0.80). Novamente, nota-se que em 2020 há uma queda súbita no  $R^2$ , assim como na região sudeste, chegando a 0.69, abaixo da média do período ( $\cong 0.72$ ).

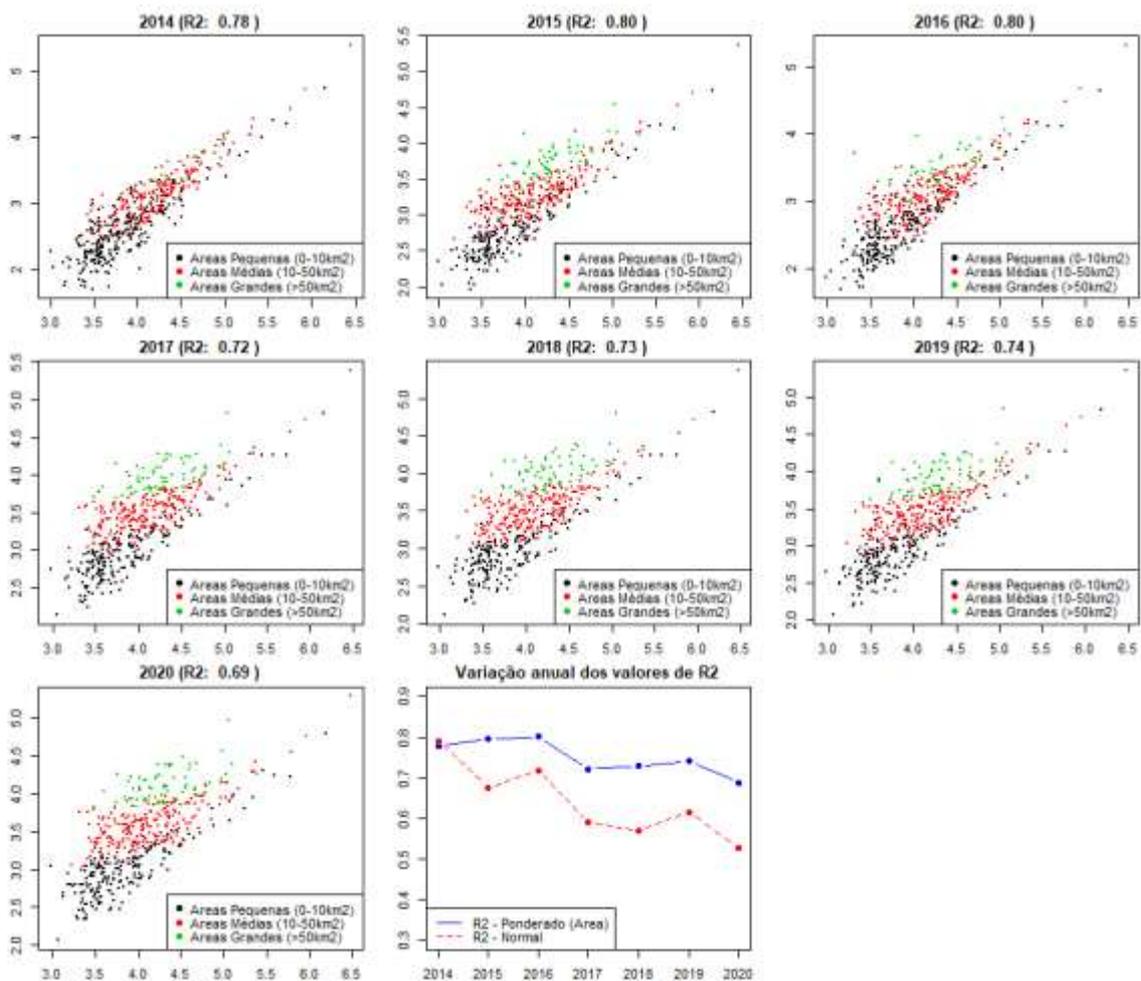


Figura 11- Gráfico de Regressão Linear Ponderada pela área dos municípios (WLS) na região Centro-oeste. Fonte: Autoria própria, 2022.

### 5.2.4. Região Norte

Os gráficos da região norte (Figura 12), no que se refere a distribuição de dados, sugerem que a correlação nos anos de 2014, 2015 e 2016 é forte. Já nos anos de 2017 a 2020, a correlação se mostra mais fraca, visto que os dados se apresentam mais espaçados. O

período todo apresenta correlação positiva. Pelo gráfico de evolução dos valores de  $R^2$  (tanto para o modelo linear normal quanto para o WLS), percebe-se que os valores dos coeficientes variam mais que nas regiões anteriores (variação de  $0.44 \sim 0.74$ ). O ano de 2020 apresentou o menor  $R^2$  (0.44), enquanto os anos de 2014 e 2016 o maior valor (0.74). Nota-se novamente que em 2020 há uma queda súbita nos valores de  $R^2$ , assim como na região Sudeste e Centro-Oeste, chegando a 0.44, valor bem inferior ao segundo menor valor de  $R^2$  da região que é de 0.54 para o ano de 2018.

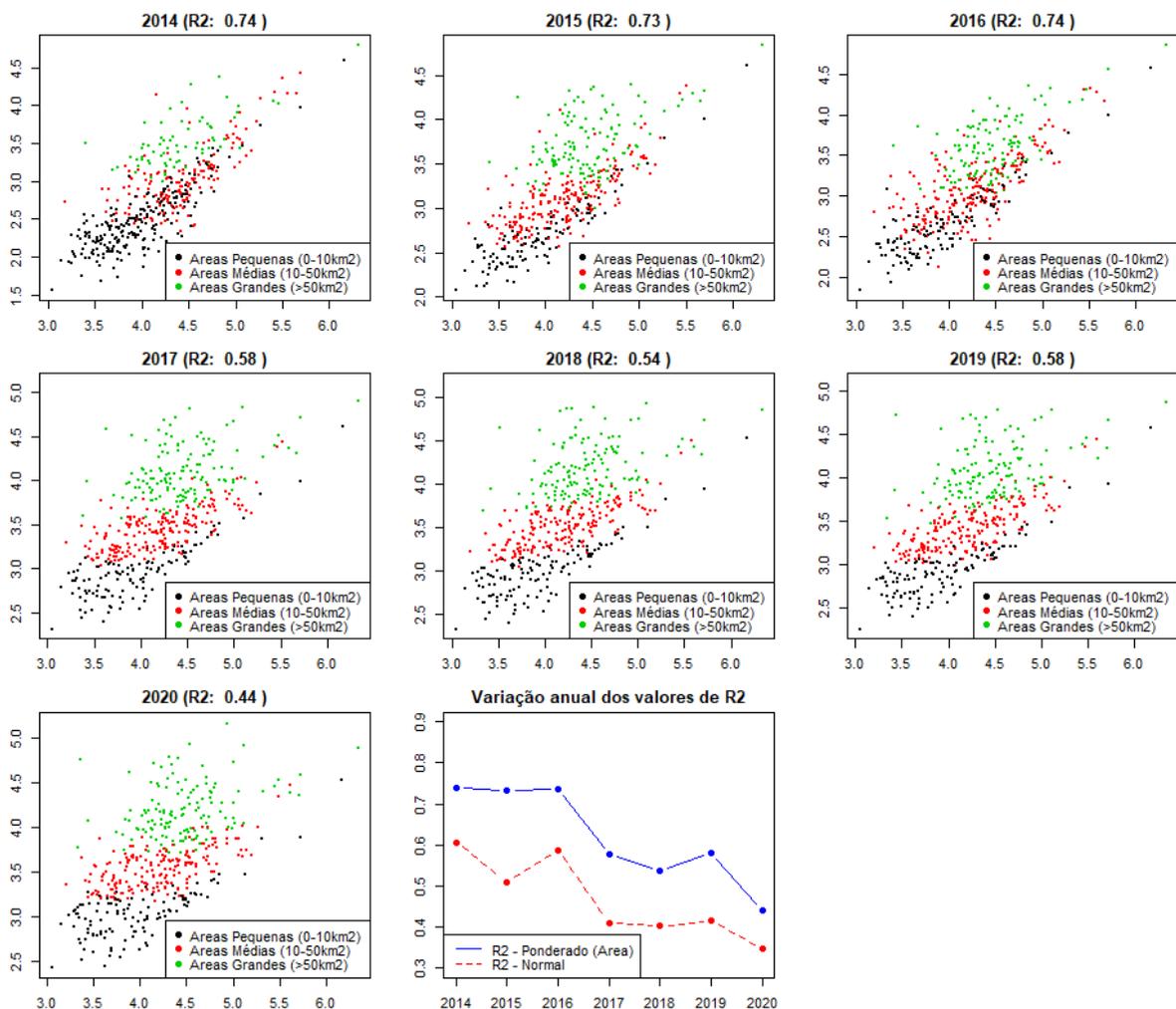


Figura 12- Gráfico de Regressão Linear Ponderada pela área dos municípios (WLS) na região Norte. Fonte: Autoria própria, 2022.

### 5.2.5. Região Nordeste

A partir dos gráficos de dispersão da região Nordeste (Figura 13), percebe-se que a relação entre luminosidade e área dos municípios segue o mesmo padrão observado para as outras regiões: luminosidade maior para áreas maiores, e maiores erros (ou menor

correlação) com o passar dos anos, além da queda observada em 2020, conforme observado nos gráficos de evolução dos valores de  $R^2$ . Este indica que os valores dos coeficientes se mantêm próximos (variação de  $0.70 \sim 0.79$ ). Nota-se que, a partir de 2017, os valores oscilam, chegando a  $0.70$  no ano de 2020. O ano de 2020 apresentou o menor  $R^2$  ( $0.70$ ), enquanto o ano de 2014 o maior valor ( $0.79$ ).

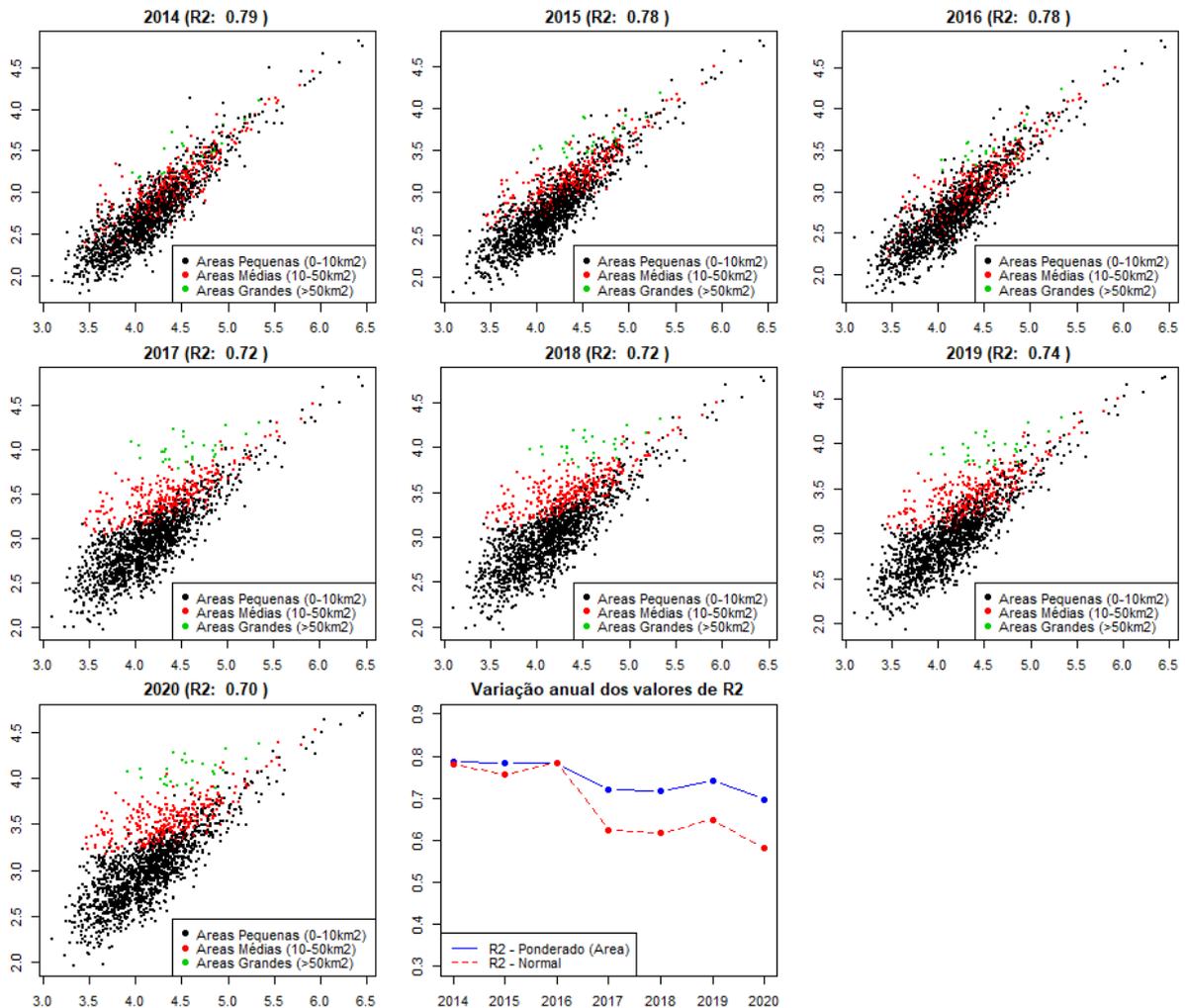


Figura 13- Gráfico de Regressão Linear Ponderada pela área dos municípios (WLS) na região Nordeste. Fonte: Autoria própria, 2022.

## 6. DISCUSSÃO

As informações extraídas dos gráficos gerados sugerem que os modelos (tanto o modelo linear simples como a regressão ponderada WLS), de modo geral, explicam bem a variabilidade dos dados, pois, para todos os anos do período analisado, observaram-se valores iguais ou superiores a 0.70 (exceto as regiões norte e centro oeste que apresentam valores inferiores).

No entanto, fica clara a variação ao longo dos anos, com a persistente redução da concordância entre as duas variáveis para (quase) todas as regiões. Nesse sentido, são elencadas três razões principais que poderiam explicar os resultados observados: (1) a expansão das áreas iluminadas; (2) os efeitos da pandemia; e, possivelmente, (3) o distanciamento das estimativas em relação ao crescimento populacional observado.

A expansão das áreas (rurais) iluminadas é evidenciada no censo de 2010 realizado pelo IBGE, que diz que cerca de 89.7% dos domicílios situados nas áreas rurais no Brasil possuem energia elétrica, valor não muito distante da área urbana (99.1%) que é a mais representativa em termos de ocupação territorial no país (IBGE, 2010); A Tabela 1 apresenta dados quantitativos fornecidos pela Empresa de Pesquisa Energética a respeito da eletrificação rural pelo Programa Luz Para Todos no Brasil e suas regiões no período de 2010 a 2019, sendo o último ano, o fim do programa (EPE, 2020). Esses dados fornecem insumos a respeito da população rural atendida pelo serviço de energia elétrica no Brasil, tais como, a quantidade total de pessoas beneficiadas no Brasil, saindo de 2.096 em 2010 para 5.681 no final de 2019.

Pode-se observar, por exemplo, que, nos anos coincidentes com os utilizados no presente estudo, houve um crescimento significativo de famílias atendidas, principalmente nas regiões norte, nordeste e centro-oeste, que são justamente as regiões que apresentaram maior divergência nos valores ao longo dos anos. Portanto, o incremento mais significativo da população atendida acaba por implicar em maior mudança na luminosidade, sem que haja um crescimento populacional na mesma proporção.

Ainda, no que diz respeito a iluminação, outro fator importante que pode ter influenciado os resultados, envolve as mudanças no tipo de iluminação. Zhao et al. (2019) dissertaram acerca da capacidade reduzida de captação de luminosidade em determinadas regiões, devido às limitações associadas a fontes de alimentação, tornando assim, mais

restrito e dificultoso a obtenção de certas informações sobre dinâmicas urbanas. Outro ponto, é que os dados DNB possuem menor sensibilidade espectral em comprimentos de onda abaixo de 500 *nm*, os tornando bem distintos do sistema visual humano. Essa questão por sua vez, alimenta problemas no que tange as comparações de cidades e estudos de tendências de iluminação, isso pelo fato de que a iluminação pública tem sido gradativamente substituída por LEDs brancos, que emitem comprimentos na faixa de 450 a 480 *nm* (KYBA et al., 2014).

Tabela 1- Programa Luz Para Todos: População atendida (em milhares)

Região/Ano	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	População Acumulada
Norte	513	283	137	105	149	105	137	109	82	143	1763
Nordeste	1001	408	316	225	175	103	146	106	148	231	2859
Sudeste	325	205	4	2	9	4	2	1	0	-	552
Sul	113	3	6	5	9	0	0	0	-	-	136
Centro-oeste	144	60	17	12	21	10	10	13	24	18	329
Brasil	2096	991	481	349	362	231	295	230	253	393	5681

Fonte- Adaptado EPE, 2020.

Essa discussão também foi abordada por Cha et al., (2014) que dizem que as lâmpadas do tipo sem corte ou semi-corte irradiam uma fração de sua luz para cima sem reflexão, as tornando similares em termos de radiância, a ordem de magnitude da luz solar, exigindo assim dos sensores noturnos a capacidade de captação de uma ampla faixa dinâmica instrumental, o que por sua vez, está distante de ser realidade (LEVIN et al., 2020). A alta resolução espacial sub expõe áreas não iluminadas (LEVIN et al., 2014) e faz com que as lâmpadas que brilham para cima saturem o sensor (LEVIN et al., 2020).

No estudo de Bustamante-Calábria et al., (2021) também foi abordado acerca da mudança do tipo de iluminação, em pesquisa feita no município de Daimiel na Espanha os autores buscaram entender a redução intensa no valor médio do brilho emitido pela mesma, descobrindo então que a cidade recentemente havia passado por uma conversão de LED,

acontecendo o mesmo para outras como Membrilla, Argamasilla, etc. Esses fatores aumentam a discrepância entre a luminosidade e densidade populacional.

Um segundo fator a ser considerado, como mencionado anteriormente, principalmente para as mudanças observadas em 2020, são as possíveis variações de luminosidade causadas pela pandemia do COVID-19. O surto epidemiológico da pandemia do COVID-19 ocorrido mundialmente, estipulou a alteração na vida da maioria das pessoas. Situações como o distanciamento social e o confinamento para diminuir os níveis de transmissão do vírus, tornaram-se algo comum durante um período, causando mudanças nas atividades a nível local, regional e nacional. Os efeitos ocasionados pela pandemia ainda estão sendo estudados, como é o caso da iluminação urbana (BUSTAMANTE-CALÁBRIA et al., 2021).

Como sugere o estudo de Xu et al. (2021), a pandemia limitou a circulação e atividades, afetando a luminosidade observada. Na Índia, houve um impacto econômico evidenciado a partir do momento que se decretou o fechamento de indústrias, fábricas e negócios em geral, além disso, percebeu-se o declínio na luminosidade noturna emitida no país (GHOSH et al., 2020). Na China, também se observou impacto no brilho da iluminação noturna, uma redução, ocorrida durante o lockdown na pandemia do COVID-19. Estima-se que houve um declínio de cerca de 3,24%, descoberto através da comparação da diferença de brilho entre imagens de compósitos mensais VNL vistas na Figura 14 (ELVIDGE, 2020).

Adicionalmente, os autores conseguiram identificar as datas de início de escurecimento e recuperação, utilizando como referência a Disneylândia de Xangai, que teve seu fechamento e reabertura bem documentados, apresentando um nível de recuperação do nível de iluminação de 81% se comparado a iluminação pré-pandemia (ELVIDGE, 2020).

Stokes e Román (2022) descobriram uma redução drástica na luz noturna de aproximadamente 5% em áreas urbanas na Arábia Saudita. Além disso, os autores afirmam que:

O número também mostra um segundo grupo de áreas urbanas da Arábia Saudita que teve sua maior redução na NTL no final do Ramadã (23 de maio a 27 de maio), correspondendo com o Eid al-Fitr. Durante este tempo, o governo saudita reforçou o toque de recolher nacional, expandindo-o das 17h às 9h para 24 horas, para reduzir eventuais reuniões ou celebrações que poderiam ter exacerbado o surto. Das 584 áreas urbanas amostradas, quase 70% apresentaram uma redução significativa (ou seja, top 15) no brilho

coincidindo com o surgimento de políticas de distanciamento físico.  
(traduzido)

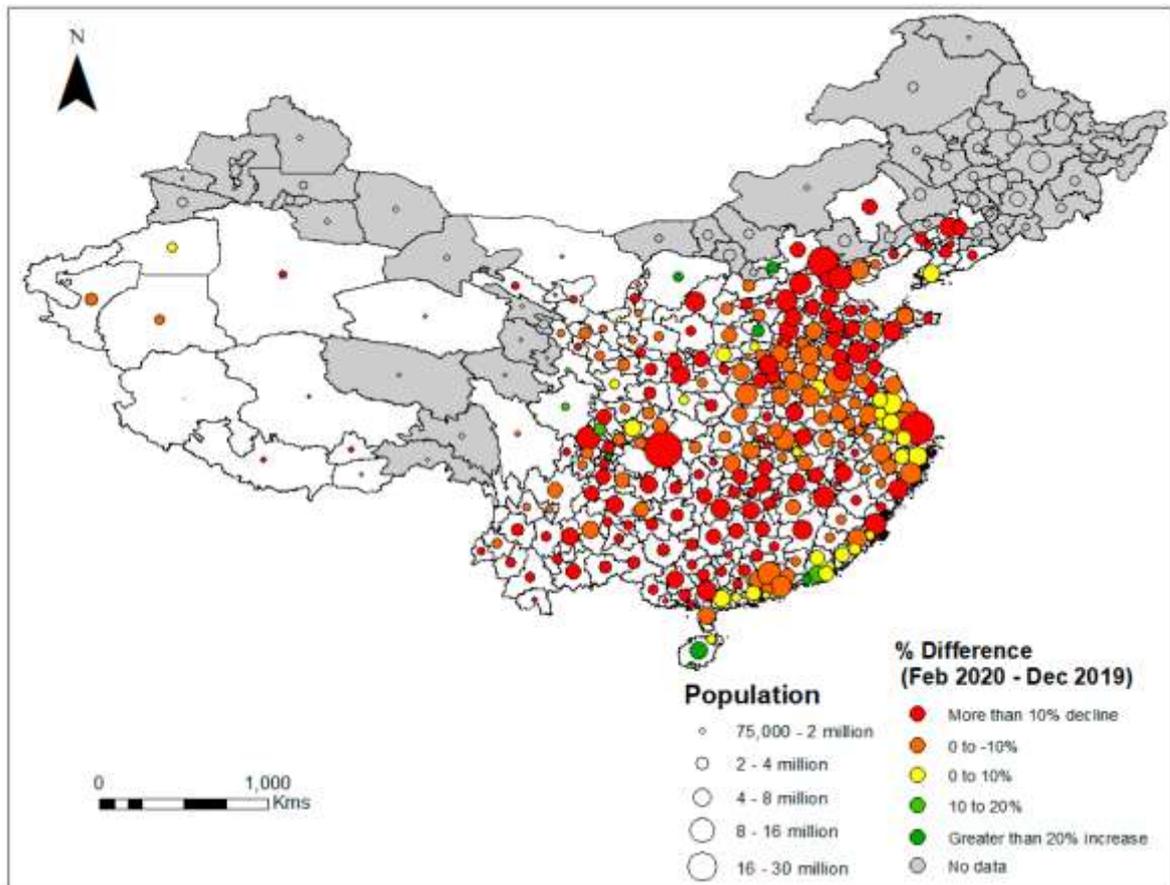


Figura 14 - Mapa das mudanças (%) no brilho na china durante a pandemia (o brilho em dezembro de 2019 menos o brilho em fevereiro de 2020). Fonte: Elvidge et al., 2020.

Estudos específicos em cidades também demonstraram os efeitos da pandemia sobre a luminosidade noturna, como Bustamante-Calábria et al., (2021), que descobriram uma redução bem evidente da poluição luminosa na cidade de Granada- Espanha durante o período de confinamento pela pandemia do COVID-19. Através de observações a distância verificaram também que a cidade estava emitindo menos brilho no céu. Os motivos por trás das reduções levantados por eles, incluem: diminuição da luz dispersa devido a redução da utilização de aerossóis antropogênicos, ocorrida devido ao confinamento; e diminuição da quantidade líquida de luz emitida pela cidade de 20% no visível e 38% na banda B, possivelmente por conta da diminuição da iluminação privada de edifícios, luzes de veículos e iluminação de áreas privadas. Ainda, concluíram que como houve uma queda de até 90% nas atividades ao ar livre, a iluminação presente não advinha das pessoas, e sim de iluminação permanente, que estava na verdade, sendo desperdiçada.

Finalmente, além dos aspectos mencionados, a queda persistente dos valores de  $R^2$ , apesar da ponderação pelas áreas dos municípios, também pode indicar que as estimativas estão se distanciando dos valores reais, possivelmente explicadas, segundo Borges et al., (2011), pela alta diversidade de municípios no território brasileiro, incluindo seu tamanho, composição da população, heterogeneidade social, econômica e distribuição espacial, que tornam mais complexas e difíceis as realizações das estimativas populacionais. Essa heterogeneidade presente nos municípios, cria um dilema sobre a metodologia empregada para realização das estimativas, visto que não seria muito plausível utilizar a mesma para todos. Ademais, cabe destacar que a criação de municípios, bem como, alterações de limites municipais, dificultam a produção das projeções, pois essas mudanças constantes geram um grande volume de dados a serem atualizados, o que na prática não acontece.

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

De modo geral, percebe-se que a relação entre densidade populacional e a luminosidade é fortemente dependente das áreas dos municípios. Apesar disso, mesmo ao considerar esse parâmetro em modelos de ajuste linear, a discrepância entre os parâmetros aumenta, como indica a diminuição dos valores de  $R^2$  ao longo dos anos. E esse aumento pode indicar, para além das limitações nos dados de luminosidade e também aos efeitos resultantes da pandemia do COVID-19 (neste caso, principalmente para a queda persistente observada no ano de 2020), que há um distanciamento das estimativas populacionais frente à realidade. A análise por regiões fornece informações mais detalhadas sobre o comportamento de cada uma, demonstrando que as áreas sul, sudeste e nordeste apresentam um melhor ajuste do modelo, enquanto a região centro-oeste e norte um ajuste não tão bom. Como um todo, os modelos WLS apresentam bons valores de coeficiente, sugerindo que o mesmo explica bem a variabilidade dos dados. Assumindo essa premissa como coerente, é possível que os dados de luzes noturnas se estabeleçam como um parâmetro adicional nos modelos para estimativas populacionais.

Cabe ressaltar que os resultados são preliminares e mais estudos devem ser feitos. Ainda, há alguns pontos que possivelmente influenciaram nos resultados e valem a pena serem mencionados. Ao ponderar a luminosidade pelo número de pixels no cálculo da radiância média dentro de cada município pode ser que características mais específicas e possivelmente relevantes tenham sido afetadas, porém, é preciso que novas análises avaliem este questionamento. Além disso, o tipo de dado VNL limitou a utilização de um limiar fixo para determinação de um parâmetro para áreas iluminadas, pois o processamento utilizado não diferencia o que é iluminação estável e não estável.

No que se refere a metodologia empregada, talvez a utilização de outras variáveis e análises fornecessem informações adicionais relevantes. Por exemplo, utilizando regressão multivariada e variáveis como a área iluminada, radiância média e/ou total, poderiam ser geradas informações sobre o tipo de população, como: população densa e urbanizada com iluminação mais proeminente, ou população menos densa e rural com iluminação menos proeminente, influenciando assim, o comportamento das projeções populacionais de determinada área. E estas análises adicionais, avaliadas de forma temporal, poderiam ainda fornecer indicadores de como a população daquela área iria se projetar no futuro.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDI, H. et al. The method of least squares. **Encyclopedia of measurement and statistics**, v. 1, p. 530-532, 2007.
- AMARAL, S. et al. Luzes noturnas do sensor VIIRS para a identificação de atividades humanas na Amazônia Brasileira: observações de uma região na Transamazônica (PA). 2015.
- ANAZAWA, T. M. et al. Integrando grade estatística e luzes noturnas em estudos populacionais: uma aplicação para apoiar o planejamento territorial na Região Metropolitana do Vale do Paraíba e Litoral Norte. **Revista Espinhaço**, 2020.
- BORGES, G. M. et al. Desafios para o IBGE nas estimativas populacionais dos municípios brasileiros: aplicação de distintas metodologias. Seminario Internacional “Estimaciones y Proyecciones de Población: Metodologías, Innovaciones y Estimación de Grupos Objetivo de Políticas Públicas”. Rio de Janeiro–RJ–Brasil, p. 35, 2011.
- BUSTAMANTE-CALABRIA, M. et al. Effects of the COVID-19 lockdown on urban light emissions: ground and satellite comparison. **Remote Sensing**, v. 13, n. 2, p. 258, 2021.
- BRITO, L. P. G. de; CAVENAGHI, S.; JANNUZZI, P. de M. Estimativas e projeções populacionais para pequenos domínios: uma avaliação da precisão para municípios do Rio de Janeiro em 2000 e 2007. **Revista Brasileira de Estudos de População**, v. 27, p. 35-57, 2010.
- CH, R. et al. Measuring the size and growth of cities using nighttime light. 2018.
- CHA, J. S. et al. Policy and status of light pollution management in Korea. **Lighting Research & Technology**, 46(1), 78-88. 2014.
- DÓRIA, V. E. M. et al. Estimativa e distribuição espacial de população urbana com imagens de satélites de luzes noturnas: um estudo para a região metropolitana de São Paulo, Brasil, com o sensor visible/infrared imaging radiometer suite (viirs). **Geografia**, v. 41, n. 3, 2016.
- DÜBEN, C.; KRAUSE, M. Population, light, and the size distribution of cities. **Journal of Regional Science**, v. 61, n. 1, p. 189-211, 2021.
- EARTH OBSERVATION GROUP (EOG). Products VNL. 2021. Disponível em: <<https://eogdata.mines.edu/products/vnl/>>. Acesso em: 29 Set 2021.
- ELVIDGE, C. D. et al. Annual time series of global VIIRS nighttime lights derived from monthly averages: 2012 to 2019. **Remote Sensing**, v. 13, n. 5, p. 922, 2021.
- ELVIDGE, C. D. et al. Mapping city lights with nighttime data from the DMSP Operational Linescan System. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 63, n. 6, p. 727-734, 1997.
- ELVIDGE, C. D. et al. Night-time lights of the world: 1994-1995. ISPRS J. Photogramm. **Remote Sensing**, v. 56, n. 2, p. 81-99, 2001.
- ELVIDGE, C. D. et al. The dimming of lights in China during the COVID-19 pandemic. **Remote Sensing**, v. 12, n. 17, p. 2851, 2020.
- ELVIDGE, C. D. et al. VIIRS night-time lights. **International Journal of Remote Sensing**, v. 38, n. 21, p. 5860-5879, 2017.

- 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, n. 0, p. 62, 2013.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2020: ano base 2019. Empresa de Pesquisa Energética, 2020.
- FAN, J. et al. Urban landscape spatial pattern estimation of cities in Shandong province using nighttime luminosity data. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences**, v. 42, 2017.
- FIGUEIREDO, D. Conceitos básicos de sensoriamento remoto. São Paulo, 2005.
- FOSTER, J. L. Observations of the Earth using nighttime visible imagery. In: Optical Engineering for Cold Environments. International Society for Optics and Photonics, 1983. p. 187-193.
- GHOSH, T. et al. The dimming of lights in India during the COVID-19 pandemic. **Remote Sensing**, v. 12, n. 20, p. 3289, 2020.
- IBGE PAÍSES. Brasil. 2021. Disponível em <<https://pais.es.ibge.gov.br/#/dados/brasil>>. Acesso em 14 Nov 2021.
- IBGE. Censo Demográfico 2010. 2010.
- IBGE. Censo Demográfico: O que é. 2021a. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/22827-censo-2020-censo4.html>>. Acesso em: 29 Set 2021.
- IBGE. Projeções da população: Brasil e Unidades da Federação. 2013.
- IBGE. Projeções da População: O que é. 2021b. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9109-projecao-da-populacao.html?=&t=o-que-e>>. Acesso em: 29 Set 2021.
- JENSEN, J. R.; COWEN, D. C. Remote sensing of urban/suburban infrastructure and socio-economic attributes. **Photogrammetric engineering and remote sensing**, v. 65, p. 611-622, 1999.
- KYBA, C. C. et al. High-resolution imagery of earth at night: New sources, opportunities and challenges. **Remote sensing**, v. 7, n. 1, p. 1-23, 2014.
- LEE, T. E. et al. The NPOESS VIIRS day/night visible sensor. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 87, n. 2, p. 191-200, 2006.
- LEVIN, N. et al. A new source for high spatial resolution night time images—The EROS-B commercial satellite. **Remote Sensing of Environment**, v. 149, p. 1-12, 2014.
- LEVIN, N. et al. Remote sensing of night lights: A review and an outlook for the future. **Remote Sensing of Environment**, v. 237, 2020.
- LI, Q. et al. Monitoring urban dynamics in the southeast USA using time-series DMSP/OLS nightlight imagery. **Remote Sensing**, v. 8, n. 7, p. 578, 2016.
- LI, X.; ZHOU, Y. Urban mapping using DMSP/OLS stable night-time light: a review. **International Journal of Remote Sensing**, v. 38, n. 21, p. 6030-6046, 2017.
- LILLESAND, T. et al. Remote sensing and image interpretation. John Wiley & Sons, 2015.

- MA, T. et al. Quantitative estimation of the velocity of urbanization in China using nighttime luminosity data. **Remote Sensing**, v. 8, n. 2, p. 94, 2016.
- MA, T. et al. Quantitative estimation of urbanization dynamics using time series of DMSP/OLS nighttime light data: A comparative case study from China's cities. **Remote Sensing of Environment**, v. 124, p. 99-107, 2012.
- MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. de. Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto. Universidade de Brasília, Brasília, 2012.
- NASA. Defense Meteorological Satellites Program (DMSP) series. 2003. Disponível em: <<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/heasarc/missions/dmsp.html>>. Acesso em: 29 Set 2021.
- NASA. **Nighttime Lights**. Earth Data, 2022. Disponível em: <<https://earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/nighttime-lights>>. Acesso em 24 Mar 2022.
- OLIVEIRA, L. A. P. de; SIMÕES, C. C. da S. O IBGE e as pesquisas populacionais. **Revista Brasileira de Estudos de População**, v. 22, p. 291-302, 2005.
- ROMÁN, M. O. et al. NASA's Black Marble nighttime lights product suite. **Remote Sensing of Environment**, v. 210, p. 113-143, 2018.
- RIOS-NETO, E. L. G.; OLIVEIRA, A. M. H. C. de. Aplicação de um modelo de idade-período-coorte para a atividade econômica no Brasil metropolitano. 1999.
- SILVA, J. P. B. C. da. Modelos de Regressão Linear e Logística utilizando o software R. 2017. Tese de Doutorado.
- SHI, K. et al. Evaluation of NPP-VIIRS night-time light composite data for extracting built-up urban areas. **Remote Sensing Letters**, v. 5, n. 4, p. 358-366, 2014.
- STOKES, E. C.; ROMÁN, M. O. Tracking COVID-19 urban activity changes in the Middle East from nighttime lights. **Scientific reports**, v. 12, n. 1, p. 1-13, 2022.
- WENG, Q. A remote sensing-GIS evaluation of urban expansion and its impact on surface temperature in the Zhujiang Delta, China. **International journal of remote sensing**, v. 22, n. 10, p. 1999-2014, 2001.
- XU, G., et al. Lockdown induced night-time light dynamics during the COVID-19 epidemic in global megacities. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, 102, 102421. 2021.
- ZHAO, M. et al. Applications of satellite remote sensing of nighttime light observations: Advances, challenges, and perspectives. **Remote Sensing**, v. 11, n. 17, p. 1971, 2019.