

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MANOELA AMARAL

O USO DE FERRAMENTAS DE GEOPROCESSAMENTO COMO APOIO NA
IMPLANTAÇÃO DE USINAS FOTOVOLTAICAS NO MUNICÍPIO DE PARANAÍ -
PR

CURITIBA

2023

MANOELA AMARAL

O USO DE FERRAMENTAS DE GEOPROCESSAMENTO COMO APOIO NA
IMPLANTAÇÃO DE USINAS FOTOVOLTAICAS NO MUNICÍPIO DE PARANAÍ –
PR

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à
graduação no curso de Engenharia
Florestal na Universidade Federal do
Paraná.

Orientadora: Prof. Dra. Ana Paula Dalla
Corte

CURITIBA

2023



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE ENGENHARIA FLORESTAL

PARECER

Defesa nº 328

A Banca Examinadora, instituída pelo Colegiado do Curso de Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, após arguir **MANOELA AMARAL** em relação ao seu Trabalho de Conclusão de Curso intitulado **O USO DE FERRAMENTAS DE GEOPROCESSAMENTO COMO APOIO NA IMPLANTAÇÃO DE USINAS FOTOVOLTAICAS NO MUNICÍPIO DE PARANAÍ - PR**, é de parecer favorável à **APROVAÇÃO** na Disciplina ENGF010 - Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Florestal, condicionada a entrega da versão final corrigida.

Profa. Dra. Maria Emilia Martins Ferreira
1. Avaliador

Prof. Dr. Jonathan Willian Trautenmüller
2. Avaliador

Profa. Dra. Ana Paula Dalla Corte
Orientadora - Presidente da Banca

Curitiba, 26 de junho de 2023.

Profa. Dra. Lucieli Rossi
Vice-Coordenadora do Curso de Engenharia Florestal

Dedico...

Ao meu amado tio Mauro.

Nenhuma palavra será capaz de expressar a magnitude da dor que sinto em meu coração por não poder ter você aqui. Este dia, que foi motivo de ansiedade para nós, carrega também a certeza de que eu poderia contar com o seu apoio incondicional. Sua confiança e convicção de que eu conseguiria me guiaram ao longo dessa jornada desafiadora. E hoje, com imensa gratidão, posso dizer que nós conseguimos! Cada página deste trabalho é um tributo à sua memória e ao impacto extraordinário que você teve em minha vida.

Com uma saudade que transcende palavras e um amor que nunca se apagará,

Mana.

À minha querida vó Maria.

Este trabalho é um também é tributo à mulher extraordinária que você foi e ao imenso vazio que sua partida deixou em nossas vidas. Sua bondade e ternura eram incomparáveis, e sua falta é sentida a cada momento. Vózinha, seu amor me nutriu, sua sabedoria me guiou e suas memórias continuam a inspirar meu caminho. Dedico este trabalho a você, com uma mistura de saudade e gratidão, na esperança de que ele seja um tributo digno da sua influência poderosa em minha vida.

Ao meu querido vô José.

Este trabalho é dedicado a você, meu amado avô, cuja presença e influência moldaram profundamente quem eu sou hoje. Sua partida pode ter sido há algum tempo, mas a conexão que compartilhamos transcende o tempo e o espaço. Este trabalho é uma homenagem à sua vida e um testemunho do impacto profundo que você teve em mim. Vô José, que suas memórias continuem a guiar meu caminho e que eu possa honrar seu legado em tudo o que faço.

Ao meu estimado tio João.

Este trabalho carrega uma dedicação especial a você, que presenteou minha jornada acadêmica com uma calculadora que se tornou mais do que um instrumento de cálculo. Foi um símbolo do seu apoio, generosidade e confiança em mim. Cada linha escrita neste trabalho é permeada pelo seu espírito encorajador e pela crença inabalável em meu potencial. A calculadora pode ter se desgastado com o tempo, mas a chama do seu amor e gratidão que ela representava continua acesa em meu coração. Tio João, sua presença é sentida e valorizada, e esta dedicatória é um tributo ao seu papel essencial em minha formação acadêmica e pessoal.

Com amor e gratidão eternos, Manu.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por guiar meus passos e me conceder força e perseverança durante todo o processo.

Ao meu pai, Manoel, pelo amor incondicional, encorajamento constante e pelos sábios conselhos que me ajudaram a superar os desafios.

À minha mãe, Marli, pela dedicação incansável, paciência infinita e por ser meu porto seguro durante os momentos de dúvida e incerteza.

Ao meu irmão, Daniel, pela cumplicidade, motivação e pela compreensão em cada etapa do meu trabalho.

Ao meu grande amor, Leonardo, por todo o apoio emocional, compreensão e por acreditar em mim quando eu mesma duvidava.

Aos meus melhores companheiros de faculdade, e agora de vida, Ana Carolina, Andrew, Caetano, Emerson, Gabriel, Isabelle e José. Cada um de vocês tem um lugar especial em meu coração. Ana, sua alegria contagiante e seu jeito amável iluminam meus dias. Andrew, sua dedicação e apoio incondicionais são um presente valioso que sempre encontro ao meu lado. Caetano, admiro sua nobreza de caráter e a sua forma de ver e lidar com o mundo. Emerson, suas palavras gentis e conselhos sempre pertinentes são um verdadeiro bálsamo para minha vida. Gabriel, sua habilidade em trazer o humor e aliviar as tensões é uma dádiva para nosso grupo. Isabelle, seu coração doce e sua bondade genuína são uma inspiração constante. José, desde o início, você tem sido meu companheiro incansável, nunca soltando minha mão e cuidando de mim de forma inigualável.

À professora Ana Paula Dalla Corte, que me orientou nesse trabalho, tornando tudo possível.

A todos vocês, agradeço por serem tão especiais e por tornarem minha jornada mais colorida e significativa. Vocês são verdadeiros presentes em minha vida, e sou grato por cada momento compartilhado e por todo o amor e apoio que recebo de cada um.

O verdadeiro valor de uma vida não está nos títulos conquistados, mas sim no amor compartilhado, nas almas tocadas e na fé inabalável que nos conecta a algo maior.

A autora (2023).

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo identificar e mapear áreas com potencial para a instalação de usinas fotovoltaicas no Município de Paranaíba, no Estado do Paraná, por meio da aplicação de ferramentas de geoprocessamento. Para tanto, realizou-se uma extensa revisão bibliográfica sobre como essas ferramentas poderiam ser utilizadas para apoio na identificação de melhores locais para a produção de energia solar, como forma de identificação dos fatores mais relevantes para a seleção de áreas propícias à implantação dessas usinas. Após a etapa de revisão, foram selecionadas as variáveis: topografia, vegetação, declividade do terreno e proximidade das subestações da COPEL para serem consideradas como principais critérios na identificação dos melhores locais. Desta forma, as ferramentas de geoprocessamento foram utilizadas para o cruzamento destas informações e, a partir destas realizar a indicação dos melhores pontos. Destaca-se que as ferramentas de geoprocessamento desempenham um papel fundamental para a identificação e mapeamento das áreas com maior potencial para a instalação de usinas fotovoltaicas no Município estudado. Acredita-se que os resultados obtidos nesse estudo possam contribuir significativamente para a promoção do uso de energias renováveis, como a solar, e para o desenvolvimento sustentável do Município, sendo que a metodologia aqui adotada poderá servir de modelo para uso em outros Municípios do Paraná. Embora tenham sido consideradas diversas variáveis, conforme citado, é importante destacar que outras poderão ser incorporadas no futuro, como: aspectos socioeconômicos, infraestrutura e viabilidade técnica. Recomenda-se que, em futuras pesquisas, sejam testadas a inclusão destas, como forma de aprimoramento da metodologia aqui proposta.

Palavras-chaves: Energia solar. Topografia. Vegetação. Declividade. Radiação solar.

ABSTRACT

This work aimed to identify and map areas with potential for the installation of photovoltaic power plants in the municipality of Paranavaí, in the state of Paraná, through the application of geoprocessing tools. For this purpose, an extensive literature review was conducted on how these tools could be used to support the identification of the best locations for solar energy production, as a way to identify the most relevant factors for selecting suitable areas for the implementation of these plants. After the review stage, the following variables were selected: topography, vegetation, terrain slope, and proximity to COPEL substations, to be considered as the main criteria in the identification of the best locations. Thus, geoprocessing tools were used to cross-reference this information and, based on this, indicate the best points. It is worth noting that geoprocessing tools play a fundamental role in identifying and mapping areas with the greatest potential for the installation of photovoltaic power plants in the studied municipality. It is believed that the results obtained in this study can contribute significantly to the promotion of the use of renewable energies, such as solar energy, and to the sustainable development of the municipality, and the methodology adopted here can serve as a model for use in other municipalities in Paraná.

Although several variables were considered, as mentioned, it is important to highlight that others may be incorporated in the future, such as socioeconomic aspects, infrastructure, and technical feasibility. It is recommended that future research tests the inclusion of these variables as a way to improve the methodology proposed here.

Keywords: Solar energy. Topography. Vegetation. Slope. Solar radiation.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 MATRIZES ENERGÉTICAS	15
2.1.1 Energia Hidrelétrica	15
2.1.2 Energia Termoelétrica	16
2.1.3 Energia Eólica	17
2.1.4 Energia Solar	17
2.1.5 Energia Nuclear	18
2.3 FERRAMENTAS DE GEOPROCESSAMENTO	19
2.3.1 Geoprocessamento	20
2.3.2 Classificação de imagens	21
2.3.2.1 Declividade	21
2.3.2.2 Vegetação	22
2.3.2.3 Incidência solar	22
2.4 NÚCLEO REGIONAL DE PARANAÍ	23
3 MATERIAIS E MÉTODOS	24
3.1 LOCALIZAÇÃO DO ESTADO	24
3.2 ANÁLISE DE DADOS	26
3.2.1 Quantum GIS	26
3.2.2 Perímetro de Imóveis Rurais	27
3.2.3.1 Declividade	29
3.2.3.2 Vegetação	30
3.2.3.3 Incidência solar	31
3.2.3.4 Copel	31
3.2.3.5 Seleção dos imóveis	33
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1 DECLIVIDADE	34
4.2 VEGETAÇÃO	36
4.3 INCIDÊNCIA SOLAR	38
4.4 SUBESTAÇÃO	40

4.5 IMÓVEIS APTOS	42
5 CONCLUSÕES	45
REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

A utilização de diferentes fontes de energia que compõem a matriz energética tem se mostrado cada vez mais importante para suprir as demandas crescentes de energia de forma sustentável. Entre essas fontes, a energia solar destaca-se como uma fonte limpa e renovável, capaz de gerar eletricidade por meio da captação da luz solar. Conforme CHAURAY e KANDPAL (2010) trata-se de uma fonte energética que está em constante evolução desde a década de 1980, quando o crescimento populacional mundial começou a superar a expansão das redes elétricas convencionais. De acordo com EPE (2017), tem-se a projeção de que o consumo de energia elétrica no Brasil triplicará até o ano de 2050. Um dos principais métodos para aproveitar essa energia é a instalação de usinas fotovoltaicas (UFVs), que consistem em conjuntos de painéis solares que convertem a luz do sol em eletricidade de forma direta, sem a necessidade de processos intermediários.

O uso de UFV tem se tornado cada vez mais comum, impulsionado pela evolução tecnológica e pela preocupação crescente com a sustentabilidade. O Brasil, devido a sua extensão territorial e, em função dos altos índices de irradiação solar, destaca-se com grande potencial de implantação dos sistemas de geração de energia fotovoltaica (Pereira et al., 2012). Nas últimas décadas, os governos têm desenvolvido programas de incentivo para o crescimento de fontes alternativas de energia elétrica, com a busca de novas tecnologias de geração renovável de baixo impacto ambiental (Rediske, et al., 2020).

As usinas fotovoltaicas são capazes de gerar energia elétrica de forma silenciosa e sem impactos negativos no clima (Teske, 2010), contribuindo para a redução dos impactos ambientais. Além disso, a energia solar é abundante, especialmente em regiões com altos índices de radiação solar, como é o caso do Estado do Paraná.

Apesar de se imaginar inicialmente que seria apenas selecionar áreas que possuam maior radiação solar, Aly et al., (2017) citam muitos outros aspectos técnicos, econômicos, ambientais e sociais que deveriam ser considerados.

As ferramentas de geoprocessamento têm potencial na manipulação das informações geográficas e o que ajuda a estudá-las de forma integrada, possibilitando assim maior compreensão sobre os resultados desta interação. O geoprocessamento é o processo que envolve o uso de tecnologias de informação geográfica para coleta,

análise e interpretação de dados espaciais. Por meio dessas ferramentas, é possível analisar diversos fatores relevantes para a seleção de áreas propícias para a instalação das UFVs, como vegetação, declividade e incidência solar, por exemplo. CELESTINO e JULIÃO (2017) citam que a ciência cartográfica tem grande potencial para auxiliar na tomada de decisões sobre os locais mais adequados e, conseqüentemente, identificar as áreas que fornecerão um maior aproveitamento do recurso energético.

Portanto, através dessa aparente necessidade encontrada, foi identificada a importância de um estudo que auxilie nas aplicações práticas das ferramentas de geoprocessamento para a escolha dos melhores locais para a instalação de UFV.

Portanto, este estudo visou desenvolver um protocolo de análise das principais variáveis de interferência na decisão pela implantação das UFVs via técnicas de geoprocessamento. Para tanto, selecionou-se o Município de Paranavaí no Estado do Paraná como piloto para tal desenvolvimento.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi identificar e mapear áreas com potencial para a implantação de usinas fotovoltaicas no Município de Paranavaí, por meio do uso de ferramentas de geoprocessamento. Além disso, buscou-se aprimorar o processo de seleção de locais para implantação de usinas fotovoltaicas, considerando a prática atual em que empreendedores do ramo de UFVs arrendam pessoalmente as terras e, posteriormente, realizam estudos para determinar sua viabilidade. A utilização desta ferramenta de geoprocessamento permite uma otimização desse processo ao apresentar previamente os melhores locais para a implantação das usinas, possibilitando que os empreendedores direcionem seus esforços diretamente às áreas mais adequadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MATRIZES ENERGÉTICAS

Uma matriz energética representa a composição das diferentes fontes de energia utilizadas em determinado país, região ou setor. Ela abrange uma variedade de fontes, como usinas hidrelétricas, termoelétricas, eólicas, solares e nucleares. Usinas hidrelétricas aproveitam a energia cinética da água em rios ou reservatórios para gerar eletricidade. As termoelétricas utilizam a queima de combustíveis fósseis, como carvão, petróleo ou gás natural, para produzir calor e acionar turbinas. As usinas eólicas convertem a energia cinética do vento em eletricidade por meio de aerogeradores. A energia solar é obtida a partir da radiação solar captada por painéis fotovoltaicos ou concentradores solares. Usinas nucleares geram eletricidade por meio de reações nucleares, utilizando o processo de fissão nuclear. A combinação e proporção dessas fontes em uma matriz energética influenciam a segurança energética, a sustentabilidade ambiental e a diversificação da oferta de energia.

2.1.1 Energia Hidrelétrica

A energia hidrelétrica é considerada limpa e renovável, utilizando recursos hídricos em constante renovação e contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa (Almeida, 2017). Além disso, a construção de grandes reservatórios nas usinas hidrelétricas permite o armazenamento de água, o que possibilita um controle eficiente do fluxo de energia elétrica de acordo com a demanda (Braga et al., 2019). Essa flexibilidade é um dos pontos fortes dessa matriz. De acordo com Silva et al. (2019): A energia hidrelétrica é uma das principais fontes de energia renovável, utilizando o potencial hidráulico dos rios por meio de barragens e usinas hidrelétricas.

As hidrelétricas também têm um impacto socioeconômico positivo, gerando empregos diretos e indiretos durante a construção e operação, além de contribuírem para o desenvolvimento regional das áreas onde estão localizadas (Fernandes, 2020). No entanto, é importante mencionar os aspectos negativos. A construção de grandes barragens pode causar impactos ambientais, como a perda de habitats naturais, a alteração de ecossistemas aquáticos e o deslocamento de comunidades locais

(Carvalho, 2018). Além disso, a formação de reservatórios aumenta o risco de desastres naturais, como enchentes e deslizamentos de terra, representando uma ameaça para as comunidades próximas às hidrelétricas (Silva, 2016). O alagamento de grandes áreas para a construção das usinas também pode resultar no deslocamento forçado de comunidades e na perda de terras agricultáveis (Santos, 2019).

2.1.2 Energia Termoelétrica

A energia termoelétrica, que utiliza a queima de combustíveis fósseis, como carvão, óleo ou gás natural, para a geração de energia elétrica, possui características que geram impactos e desafios. Para Santos (2018) os combustíveis fósseis utilizados são amplamente disponíveis em muitas regiões do mundo, o que facilita a sua utilização como fonte de energia. Além disso, as usinas termoelétricas são capazes de fornecer energia de forma contínua, independentemente das condições climáticas ou sazonais, garantindo um suprimento constante de eletricidade (Almeida, 2019). Outra vantagem é que, em muitos países, já existe uma infraestrutura estabelecida para a utilização de usinas termoelétricas, o que pode facilitar a expansão ou modernização desse tipo de matriz (Ferreira, 2017).

No entanto, é importante considerar os aspectos negativos associados à matriz termoelétrica. A queima de combustíveis fósseis nas usinas termoelétricas é uma das principais fontes de emissões de dióxido de carbono (CO₂) e outros gases de efeito estufa, contribuindo significativamente para o aquecimento global e as mudanças climáticas (Pereira, 2020). Além das emissões de gases poluentes, a operação das usinas termoelétricas pode causar impactos ambientais locais, como a poluição do ar, do solo e da água, além da geração de resíduos tóxicos, como as cinzas resultantes da queima de carvão (Gomes, 2018). Outro aspecto negativo é a dependência dos combustíveis fósseis, recursos não renováveis que são finitos e esgotáveis, o que pode gerar incertezas quanto à segurança energética a longo prazo (Oliveira, 2018).

2.1.3 Energia Eólica

A energia eólica é uma fonte renovável e praticamente inesgotável, uma vez que os ventos são gerados pelos gradientes de temperatura e pressão atmosférica, que são fenômenos naturais constantes (Bastos, 2017). Além disso, a utilização da energia eólica contribui para a redução das emissões de gases poluentes, como o dióxido de carbono, auxiliando no combate às mudanças climáticas (Pereira, 2020). Outro benefício é o impacto visual reduzido, uma vez que as turbinas eólicas podem ser instaladas em áreas rurais ou marítimas, minimizando o impacto visual em comparação com outras formas de geração de energia (Souza, 2018).

No entanto, a geração de energia eólica depende das condições climáticas, sendo variável e intermitente. Em momentos de baixa intensidade dos ventos, a produção de eletricidade pode ser afetada (Rocha, 2019). Além disso, a instalação de parques eólicos pode ter impactos negativos na fauna local, especialmente para aves migratórias e morcegos, além de causar alterações no ecossistema em que são implantados (Silva, 2017). Por fim, para aproveitar plenamente o potencial eólico, é necessário reservar grandes áreas para a instalação de turbinas eólicas, o que pode gerar conflitos com outras atividades, como agricultura e conservação ambiental (Santos, 2016).

2.1.4 Energia Solar

Segundo Amaral et al. (2020) a energia solar é uma forma de energia proveniente do sol, sendo considerada uma fonte inesgotável e limpa. A energia solar é considerada uma fonte limpa e segura, que não emite gases de efeito estufa nem poluentes atmosféricos durante a geração de eletricidade (Agência Internacional de Energia, 2020).

A utilização da energia solar também possui benefícios econômicos. Embora os custos iniciais de instalação sejam consideráveis, a energia solar pode gerar economia a longo prazo, uma vez que a fonte de energia é gratuita e a manutenção dos sistemas é relativamente baixa (Almeida, 2019).

No entanto, para Pereira (2020) a disponibilidade da radiação solar varia ao longo do dia e ao longo do ano, o que torna a geração de energia solar intermitente e dependente das condições climáticas.

De acordo com Smith e Taylor (2019) estudos indicam que a eficiência dos painéis solares fotovoltaicos aumentou consideravelmente ao longo do tempo, resultando em uma maior capacidade de geração de eletricidade.

Além disso, pesquisas em materiais fotovoltaicos têm buscado novos materiais mais eficientes e de baixo custo, como as perovskitas. As perovskitas têm sido amplamente estudadas como materiais fotovoltaicos promissores, devido às suas propriedades únicas e potencial de alta eficiência de conversão de energia (Yang et al., 2020).

Grupta e Kumar (2018) dizem que o potencial dos sistemas de concentração solar tem se destacado para aumentar a eficiência da conversão solar e a viabilidade econômica da energia solar concentrada.

Para Li et al. (2021), estudos têm apontado para a redução significativa dos custos de instalação de sistemas solares fotovoltaicos nos últimos anos, devido aos avanços tecnológicos e à maior escala de produção. Os avanços na tecnologia fotovoltaica e a escala de produção têm contribuído para a redução dos custos dos painéis solares, tornando a energia solar uma opção mais acessível e competitiva. Zheng et al. (2019)

Já Mendonza-Vizcaino et al. (2017) diz que a análise econômica de sistemas solares fotovoltaicos tem indicado um retorno do investimento atrativo e redução dos custos de eletricidade a longo prazo em várias regiões.

Segundo Denholm e Margolis (2017), a integração eficiente de sistemas solares à rede elétrica é um desafio técnico e econômico que precisa ser abordado para garantir uma transição suave para um sistema de energia solar.

2.1.5 Energia Nuclear

A energia nuclear, que utiliza a fissão nuclear para gerar energia elétrica, possui características que geram debates e controvérsias. Conforme Pereira (2019) a energia nuclear apresenta uma série de aspectos positivos. Em primeiro lugar, possui uma alta densidade energética, ou seja, pequenas quantidades de material nuclear podem gerar uma quantidade significativa de energia elétrica. Além disso, a geração de energia nuclear emite quantidades menores de gases de efeito estufa em comparação com outras fontes de energia convencionais, como carvão e gás natural, contribuindo

para a redução das emissões de gases poluentes (Almeida, 2018). Outra vantagem é o fornecimento contínuo de energia, já que as usinas nucleares não estão sujeitas às variações climáticas ou sazonais que afetam outras fontes de energia renovável (Santos, 2021).

No entanto, a matriz nuclear também apresenta desafios e aspectos negativos. O principal desafio está relacionado aos riscos de acidentes nucleares, como os ocorridos em Chernobyl e Fukushima, que evidenciaram as consequências devastadoras para a saúde humana e o meio ambiente, além de não ser renovável (Ferreira, 2017). Gomes (2020) também completa dizendo que a geração de energia nuclear resulta na produção de resíduos radioativos de longa vida útil, que exigem um cuidadoso armazenamento e gestão a longo prazo para garantir a segurança e a proteção do meio ambiente. Outro aspecto negativo é a preocupação com a proliferação nuclear, uma vez que a tecnologia nuclear pode ser usada tanto para fins pacíficos como para o desenvolvimento de armas nucleares, aumentando a preocupação com a segurança internacional (Oliveira, 2019).

2.3 FERRAMENTAS DE GEOPROCESSAMENTO

Como destacado por Silva et al. (2018), o geoprocessamento envolve o uso de ferramentas como sistemas de informações geográficas (SIG), *softwares* de sensoriamento remoto, modelagem de dados espaciais e análise espacial para entender e tomar decisões sobre o mundo real com base em sua representação digital.

Para Câmara et al. (2002) os SIGs permitem a integração de dados geográficos e alfanuméricos, bem como a realização de análises espaciais e modelagem de fenômenos complexos. A análise espacial é uma disciplina que oferece um conjunto de conceitos e técnicas para descrever e explicar os padrões geográficos e suas relações com fatores ambientais e sociais. O'Sullivan e Unwin (2018).

Openshaw e Abrahart (2000) afirmam que a modelagem espacial é uma abordagem sistemática que permite a exploração de processos espaciais complexos, a previsão de eventos futuros e a avaliação de diferentes cenários.

Para Jensen (2007):

O sensoriamento remoto fornece informações sobre a Terra através da aquisição, processamento e interpretação de imagens obtidas de sensores que não estão em contato direto com o objeto estudado."

Conforme MacEachren et al. (2005) destacam, que a visualização geográfica é o processo de representar informações geográficas de forma visual e interativa, utilizando técnicas gráficas e computacionais para explorar, analisar e comunicar padrões e tendências espaciais.

2.3.1 Geoprocessamento

Segundo Câmara et al. (2001) o geoprocessamento é essencial para o gerenciamento de informações geográficas e a tomada de decisões em nível local, regional e nacional. Ele permite a integração de diferentes tipos de dados, como mapas, imagens de satélite e dados socioeconômicos, fornecendo uma visão abrangente e atualizada do território.

No Brasil, o desenvolvimento do geoprocessamento está diretamente relacionado ao avanço da tecnologia e à disponibilidade de dados geoespaciais. Autores como Câmara et al. (2001) e Queiroz Neto (2005) destacam o papel dos SIGs como ferramentas fundamentais no processo de análise espacial e na tomada de decisões baseadas em informações geográficas.

O geoprocessamento também desempenha um papel importante na gestão ambiental. Galvão et al. (2009) e Rocha et al. (2012) enfatizam a utilização do geoprocessamento e do sensoriamento remoto para monitorar áreas protegidas, identificar mudanças no uso da terra e avaliar impactos ambientais. Essas ferramentas permitem uma análise mais precisa e eficiente do meio ambiente, auxiliando na elaboração de políticas de conservação e na mitigação de problemas ambientais.

No setor agrícola, o geoprocessamento é amplamente utilizado para o mapeamento e monitoramento de culturas, planejamento de safras e gestão de recursos hídricos. Ferreira et al. (2015) ressalta também a importância do geoprocessamento na tomada de decisões agrícolas, permitindo uma gestão mais eficiente das atividades no campo e o aumento da produtividade.

2.3.2 Classificação de imagens

De acordo com estudos realizados por Li et al. (2018), a classificação de imagens de geoprocessamento também permite identificar diferentes tipos de solo, como solos arenosos, argilosos, orgânicos e rochosos. Essa classificação é importante, pois cada tipo de solo possui propriedades físicas e químicas distintas, que podem influenciar na instalação e no desempenho das usinas fotovoltaicas.

Além disso, a classificação de imagens também pode auxiliar na identificação de áreas com cobertura vegetal significativa ou presença de obstáculos que possam prejudicar a eficiência das usinas fotovoltaicas, como árvores de grande porte. Ao mapear essas áreas, é possível otimizar o planejamento e o projeto das usinas, garantindo uma melhor eficiência energética e maximizando a produção de energia solar (Li et al., 2018).

A classificação de imagens de geoprocessamento é uma técnica fundamental para a interpretação e análise de dados espaciais.

2.3.2.1 Declividade

De acordo com pesquisas realizadas por Silva et al. (2020), o georreferenciamento tem sido aplicado com sucesso na identificação de locais adequados para usinas fotovoltaicas, levando em consideração a declividade do terreno. A análise georreferenciada da declividade pode ajudar a determinar a inclinação ideal dos painéis solares, maximizando a captação da energia solar incidente. Além disso, estudos de Zhai et al. (2019) destacam que a utilização do georreferenciamento na seleção de locais para usinas fotovoltaicas pode contribuir para uma melhor eficiência e produtividade dessas instalações, uma vez que a inclinação correta dos painéis solares afeta diretamente a quantidade de energia gerada.

Para Santos et al. (2015) a classificação de imagens de declividade é uma ferramenta importante para a identificação de áreas com diferentes graus de inclinação e declividade. Eles também destacam que essa análise auxilia na delimitação de áreas suscetíveis a processos erosivos e na identificação de regiões propícias para o desenvolvimento de atividades agrícolas e florestais.

2.3.2.2 Vegetação

A análise da vegetação é de extrema importância no estudo da implantação de usinas fotovoltaicas, e o geoprocessamento se apresenta como uma ferramenta essencial nesse contexto. Por meio do uso de técnicas de sensoriamento remoto e SIG, é possível obter dados precisos sobre a cobertura vegetal e sua distribuição espacial.

Para Silva, Santos e Lima (2021) a utilização do geoprocessamento permite a identificação e mapeamento das áreas de vegetação que podem interferir no desempenho das usinas fotovoltaicas, contribuindo para o planejamento adequado e a mitigação de possíveis sombreamentos. A combinação de informações sobre a vegetação, topografia e exposição solar por meio do geoprocessamento possibilita a identificação de áreas com alto potencial para a instalação de usinas fotovoltaicas, levando em consideração a interação entre a vegetação e a disponibilidade de luz solar, Oliveira et al. (2020).

Para Santos et al. (2019) o uso do geoprocessamento possibilita a identificação precisa das áreas de vegetação densa que podem interferir na instalação e operação de usinas fotovoltaicas, permitindo uma melhor seleção de locais adequados para a implantação.

2.3.2.3 Incidência solar

Segundo Costa et al. (2022) o geoprocessamento possibilita a análise da incidência solar, permitindo a identificação de áreas com maior potencial de geração de energia solar, levando em consideração a variação espacial da radiação solar.

A combinação de informações sobre a incidência solar, topografia e cobertura vegetal por meio do geoprocessamento possibilita a identificação de áreas com maior eficiência na geração de energia fotovoltaica, considerando a interação desses fatores. Rodrigues et al. (2020)

2.4 NÚCLEO REGIONAL DE PARANAVÁI

O Núcleo Regional de Paranaíba está localizado na região noroeste do Estado do Paraná, apresentando uma posição estratégica que favorece o acesso a importantes vias de transporte, como as rodovias PR-158 e PR-180.

De acordo com Silva et al. (2019) Paranaíba está situada em uma posição geográfica privilegiada, com fácil acesso a importantes rodovias e proximidade com centros urbanos, o que estimula o crescimento da região e o estabelecimento de atividades econômicas diversificadas.

Segundo Santos et al. (2020) a agricultura no núcleo regional desempenha um papel fundamental na economia local, com destaque para a produção de grãos, como soja e milho, e o cultivo de frutas e olerícolas.

Além da agricultura, também são encontradas áreas destinadas à criação de animais, bem como a presença de comércio e serviços diversos, contribuindo para a diversificação das atividades econômicas na região (Oliveira et al., 2021).

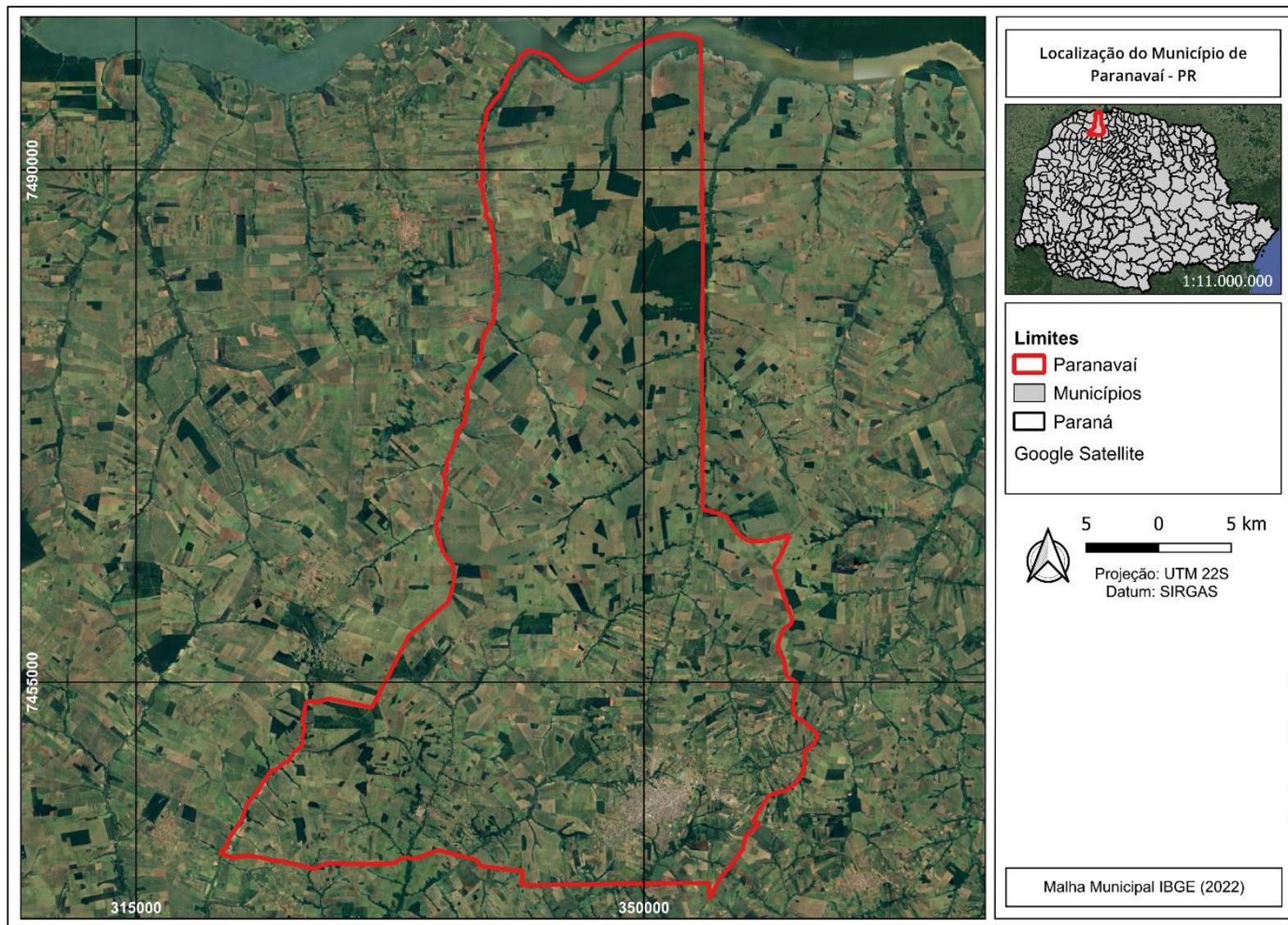
Um estudo realizado por Batista et al. (2018) analisou o potencial de geração de energia solar fotovoltaica na região noroeste do Paraná, que inclui o Núcleo Regional de Paranaíba. Os resultados do estudo indicaram que a região apresenta um alto potencial para a geração de energia solar, com uma média anual de radiação solar em torno de 5000 Wh/m² por dia. Esse potencial torna a região propícia para a instalação de usinas fotovoltaicas e o aproveitamento da energia solar como fonte renovável e sustentável.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 LOCALIZAÇÃO DO ESTADO

Paranavaí é uma cidade localizada no Estado do Paraná, Brasil (FIGURA 1). Situada a cerca de 520 km a noroeste da capital do Estado, Curitiba, Paranavaí está geograficamente localizada a aproximadamente 23°04' de latitude sul e 52°28' de longitude oeste. A cidade está situada na região noroeste do Estado e faz parte da Mesorregião Noroeste Paranaense e da Microrregião de Paranavaí (IBGE, 2018).

FIGURA 1 - LOCALIZAÇÃO DO MUNICÍPIO DE PARANAVÁI – PR



FONTE: A autora (2023).

O Município apresenta características marcantes em relação à vegetação e à incidência solar. A caracterização do IBGE (2004) indica que a região é classificada dentro do bioma Mata Atlântica, mais especificamente no Domínio Floresta Estacional Semidecidual. Essa formação vegetal é caracterizada pela presença de árvores de porte médio, com folhas que caem durante um determinado período do ano.

De acordo com Costa et al., (2015) a vegetação predominante em Paranavaí é composta por remanescentes de floresta estacional semidecidual e áreas de vegetação secundária. Essa configuração reflete a importância da preservação ambiental na região.

Em relação à incidência solar, o Município de Paranavaí, assim como a maior parte do Estado do Paraná, está situado em uma latitude que permite uma boa exposição à luz solar ao longo do ano. Estudos sobre o clima e a radiação solar no Estado mostram que a região possui uma elevada irradiação solar, especialmente durante o período de verão (Santos et al., 2012). Isso torna a região propícia para o desenvolvimento de projetos de energia solar e pode influenciar na agricultura local.

3.2 ANÁLISE DE DADOS

3.2.1 Quantum GIS

Para o processamento de dados do presente trabalho foi utilizado o software QGIS, por meio dele foram gerados os mapas de declividade, vegetação e incidência solar, bem como os ajustes de perímetros dos imóveis e outros aspectos relevantes.

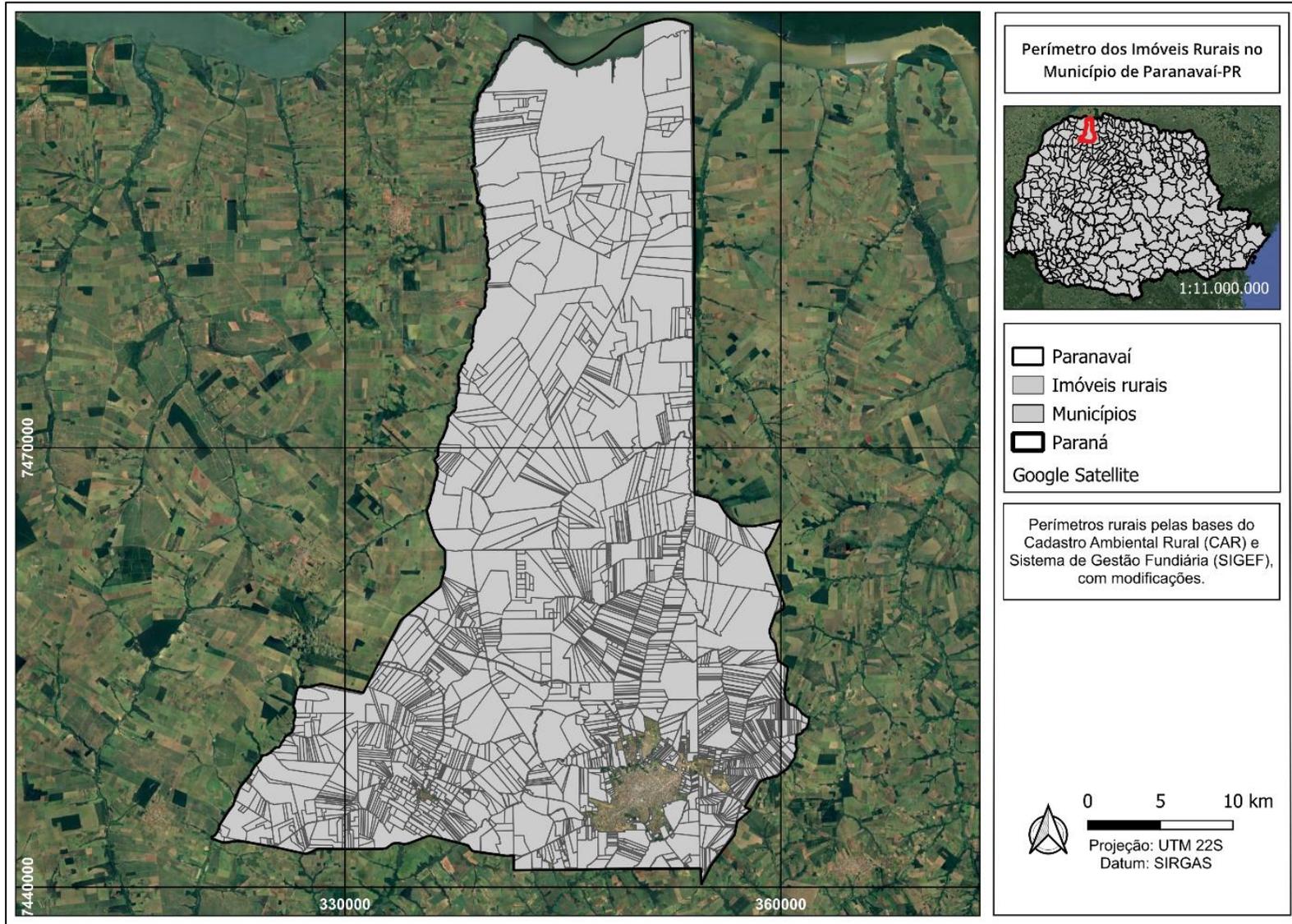
O QGIS foi escolhido devido à sua interface intuitiva e recursos avançados, permitindo uma análise abrangente dos dados geoespaciais. Os mapas de declividade forneceram informações sobre as variações do terreno, enquanto o de vegetação possibilitou avaliar a saúde e a cobertura vegetal. A análise da incidência solar auxiliou na identificação de áreas com potencial para aproveitamento da energia solar. Além disso, o QGIS foi utilizado para ajustar os perímetros dos imóveis, garantindo maior precisão nas representações.

3.2.2 Perímetro de Imóveis Rurais

Para o processamento de dados, foi necessário estabelecer os limites dos imóveis rurais no Município de Paranaíba. Para esse fim, foram utilizadas as bases de dados do Cadastro Ambiental Rural (CAR) e do Sistema de Gestão Fundiária (SIGEF).

É importante observar que alguns dados fornecidos pelo CAR podem não ser totalmente confiáveis ou apresentar irregularidades e sobreposições. A fim de permitir o uso desses dados, foram feitos ajustes manuais, nos quais os perímetros foram corrigidos visualmente. É possível, no entanto, que ainda existam falhas ou imprecisões nos perímetros dos imóveis considerados, uma vez que esses ajustes não foram baseados em medições de campo. Já os dados provenientes do SIGEF dizem respeito aos imóveis certificados pelo INCRA e, portanto, espera-se que estejam precisos em termos de perímetro. Essas questões, entretanto, não representam um problema para o processamento de dados, pois a delimitação dos imóveis tem como objetivo principal a sua localização, e não a obtenção precisa de suas áreas ou coordenadas corretas. Com isso, foram obtidos 2.286 imóveis para o estudo, conforme é possível observar na Figura 2.

FIGURA 2 - PERÍMETRO DOS IMÓVEIS RURAIS DO MUNICÍPIO DE PARANAÍ - PR



FONTE: A autora (2023).

3.2.3 Variáveis consideradas no estudo

3.2.3.1 Declividade

Os dados de declividade utilizados neste estudo foram obtidos a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) disponibilizado pelo Topodata, um serviço do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Esses dados adquiridos possuem data de 21/09/2011 e consistiram em quatro imagens individuais do MDE, as quais foram mescladas no software QGIS para formar uma única imagem que foi utilizada no cálculo da declividade. Cabe destacar que as imagens do MDE do Topodata possuem diferentes resoluções espaciais, variando de 30 metros a 90 metros.

Para calcular a declividade, o MDE foi processado considerando as diferenças de altitude entre as células vizinhas. No contexto deste estudo, o processamento dos dados de declividade com o MDE do Topodata permitiu obter informações detalhadas sobre as variações de inclinação do terreno, auxiliando na identificação de áreas com maior ou menor declividade.

Vale ressaltar que, para a análise da declividade, foram adotadas as classes propostas pela Embrapa (2006). Essas classes permitem uma classificação mais detalhada das áreas em relação à sua declividade. As classes de declividade propostas são as seguintes:

1. Classe 1: De 0 a 3% - Plano
2. Classe 2: De 3 a 8% - Suave ondulado
3. Classe 3: De 8 a 20% - Ondulado
4. Classe 4: De 20 a 45% - Forte ondulado
5. Classe 5: De 45 a 75% - Montanhoso
6. Classe 6: Acima de 75% - Escarpado

Portanto, o uso dos dados de declividade obtidos a partir do MDE do Topodata do INPE com as classes de declividade propostas pela Embrapa, juntamente com a análise espacial realizada neste trabalho, contribui para a identificação de áreas propícias para a instalação de usinas fotovoltaicas.

3.2.3.2 Vegetação

No presente estudo, a vegetação foi analisada através do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) é um índice amplamente utilizado na área de sensoriamento remoto para avaliar a vegetação em uma determinada área. O NDVI foi calculado usando dados de reflectância provenientes de imagens de satélite ou sensoriamento remoto.

O cálculo do NDVI foi introduzido por Rouse et al. em 1973, no artigo intitulado "Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Greenwave Effect) of Natural Vegetation". O artigo foi publicado na revista *Remote Sensing of Environment*, volume 4, páginas 301-312. O estudo original descreveu o uso do NDVI como uma métrica para monitorar a dinâmica da vegetação ao longo do tempo. O resultado do cálculo do NDVI varia de -1 a +1. Os valores negativos próximos a -1 indicam áreas de água, enquanto valores próximos a +1 indicam áreas de vegetação densa e saudável. Valores próximos a zero geralmente representam áreas sem vegetação, como solo exposto ou áreas urbanas

Ele se baseia na diferença entre a reflectância do infravermelho próximo (NIR) e a reflectância do vermelho (RED) de uma superfície. A fórmula do NDVI é a seguinte:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED})$$

O resultado do cálculo do NDVI varia de -1 a 1, onde valores próximos a -1 indicam pouca ou nenhuma vegetação, valores próximos a 1 indicam vegetação densa e valores próximos a 0 indicam pouca variação na vegetação.

Essa ferramenta é uma medida útil para analisar a saúde das plantas, a cobertura vegetal e as mudanças na vegetação ao longo do tempo. Ele é usado em várias aplicações, como estudos ambientais, monitoramento agrícola, detecção de incêndios florestais, previsão de safras e avaliação do impacto das mudanças climáticas na vegetação.

A seleção dos imóveis se baseou em identificar aqueles que possuem menos de 20% de cobertura vegetal em sua área. Esse critério foi estabelecido tendo em vista que as usinas solares necessitam de uma área livre de obstáculos e interferências que possam reduzir a eficiência da captação solar. Além disso, o valor de 20% é considerado o índice de reserva legal para a Mata Atlântica, um importante

ecossistema brasileiro, portanto é necessário levar em consideração que o Código Florestal brasileiro de 2012 (Lei nº 12.651/2012) estabelece as disposições gerais sobre a proteção da vegetação nativa, incluindo a reserva legal.

A base de dados para essa variável foi uma imagem CBERS 4-A com resolução de 2m, datada em 14 de maio de 2023, disponibilizada pelo INPE através de seu catálogo de imagens.

3.2.3.3 Incidência solar

O NDSI (*Normalized Difference Solar Index*) é um índice utilizado para estimar a radiação solar potencial em uma determinada região. Ele é calculado a partir de dados de radiação solar global e difusa, levando em consideração fatores como a inclinação e a orientação dos painéis solares, a latitude, a altitude e a cobertura de nuvens.

O NDSI é calculado pela seguinte fórmula:

$$\text{NDSI} = (\text{GHI} - \text{DHI}) / \text{GHI}$$

Onde o GHI (*Global Horizontal Irradiance*) é a radiação solar global incidente na horizontal, representando a radiação direta e difusa e o DHI (*Diffuse Horizontal Irradiance*) é a radiação solar difusa incidente na horizontal, representando a radiação difusa causada pela dispersão da luz solar na atmosfera.

O resultado do NDSI varia de 0 a 1, sendo que valores mais próximos de 1 indicam uma maior radiação solar potencial na região analisada. Valores próximos de 0 indicam uma menor radiação solar potencial.

No trabalho atual, os resultados foram classificados em valores de kWh/m².ano, já que a base de dados utilizada é proveniente de um MDE.

3.2.3.4 Copel

Atualmente a COPEL está envolvida em projetos de pesquisa e desenvolvimento, buscando constantemente a inovação e a melhoria tecnológica no setor de energia elétrica. A empresa também tem se destacado por suas ações de responsabilidade

socioambiental, com programas de eficiência energética, incentivo ao uso de energias renováveis e projetos de sustentabilidade (COPEL, 2021). Ela realiza a conexão de usinas fotovoltaicas com suas bases energéticas por meio de um processo chamado de conexão à rede. Esse processo envolve uma série de etapas e requisitos técnicos para garantir a segurança e a eficiência da integração da energia solar fotovoltaica ao sistema elétrico. Dentre eles, podemos citar:

1. Estudos de viabilidade: Antes da instalação da usina fotovoltaica, são realizados estudos técnicos e de viabilidade para avaliar a capacidade do sistema elétrico existente em receber a energia gerada pela usina solar. Esses estudos levam em consideração a capacidade da rede de transmissão e distribuição, a estabilidade do sistema e outros aspectos técnicos, como declividade do solo, vegetação na área, incidência solar,
2. Projeto e licenciamento: Com base nos estudos de viabilidade, é desenvolvido um projeto detalhado da usina fotovoltaica, levando em consideração os requisitos técnicos e normas aplicáveis. Além disso, são obtidas as licenças e autorizações necessárias junto aos órgãos reguladores e ambientais.
3. Construção da usina: Após a aprovação do projeto e a obtenção das licenças, a usina fotovoltaica é construída de acordo com as especificações técnicas. Isso envolve a instalação de painéis solares, estruturas de suporte, sistemas de conversão de energia (inversores), sistemas de monitoramento, entre outros componentes.
4. Conexão à rede: A conexão da usina fotovoltaica à rede da Copel é realizada por meio de uma subestação, onde a energia gerada pela usina é transformada para a tensão adequada e injetada na rede elétrica. São instalados equipamentos de proteção, medição e controle para garantir a operação segura e confiável.
5. Testes e comissionamento: Após a conexão física, são realizados testes e verificações para garantir que a usina fotovoltaica esteja operando corretamente e cumprindo os requisitos técnicos e regulatórios. Esses testes incluem a medição de parâmetros elétricos, a verificação da resposta da usina a eventos anormais, entre outros.

Nesse contexto, é pertinente destacar que, para o presente trabalho, o foco foi exclusivamente o item 1, no qual foi realizado o estudo de viabilidade.

3.2.3.5 Seleção dos imóveis

A seleção dos locais ideais para a implantação de usinas fotovoltaicas é um processo crucial para garantir a eficiência e a produtividade da geração de energia solar. Nesse sentido, foram adotados critérios como declividade do terreno, vegetação e incidência solar para classificar os imóveis mais adequados.

A declividade do terreno desempenha um papel fundamental, uma vez que terrenos com menor inclinação ou declive suave oferecem vantagens significativas. Essas áreas facilitam a instalação dos painéis solares, permitindo um posicionamento ideal para captar a luz solar de maneira eficiente. Por outro lado, terrenos com declives acentuados podem apresentar desafios, exigindo a implementação de estruturas adicionais para suportar os painéis solares.

A presença de vegetação também foi considerada na análise dos locais. É preferível escolher áreas desprovidas de árvores e obstáculos que possam causar sombreamento nos painéis solares, afetando negativamente a geração de energia. Portanto, terrenos com vegetação rasteira ou com pouca cobertura vegetal foram considerados mais adequados para a instalação das usinas fotovoltaicas.

Além disso, a incidência solar desempenha um papel crucial na maximização da produção de energia solar. Locais com alta incidência solar, ou seja, com menor obstrução da luz solar ao longo do dia, foram prioritários na seleção. Isso garante uma quantidade adequada de radiação solar atingindo os painéis solares, otimizando assim a geração de energia.

Para avaliar os critérios mencionados, foram utilizadas imagens resultantes de processamentos específicos. Essas imagens permitiram a interpretação e análise da declividade do terreno, identificação da presença de vegetação e avaliação da incidência solar nos diferentes locais considerados. Com base nessa análise, os imóveis foram classificados de acordo com seus melhores resultados nos critérios estabelecidos, priorizando aqueles que oferecem as condições mais favoráveis para a instalação de usinas fotovoltaicas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

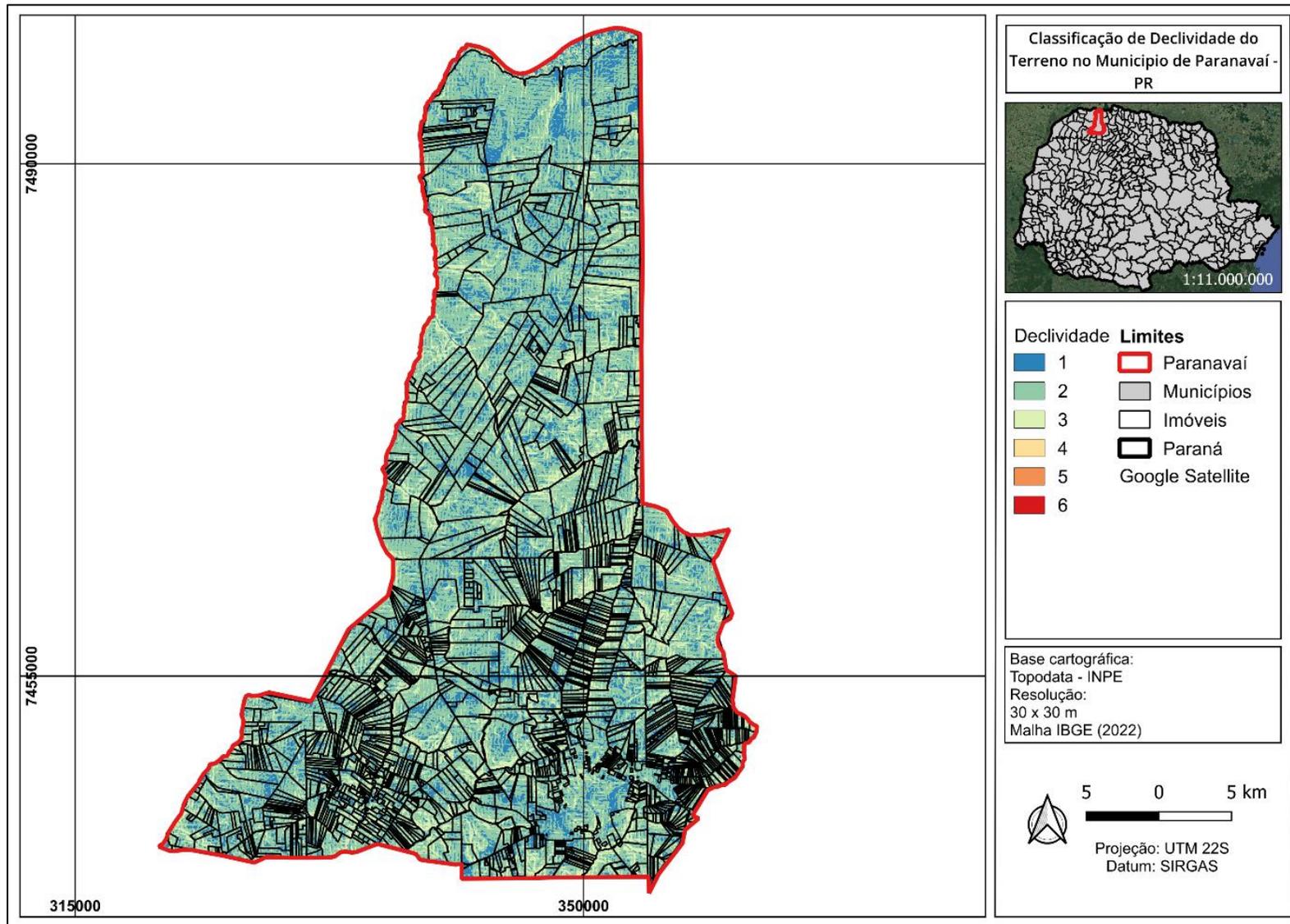
4.1 DECLIVIDADE

A declividade do terreno ideal para a implantação de usinas fotovoltaicas varia dependendo do tipo de instalação e do sistema de montagem utilizado. No entanto, geralmente é recomendado que o terreno tenha a menor declividade possível para garantir uma eficiência adequada das usinas fotovoltaicas.

Para instalações fixas no solo, a declividade ideal geralmente varia entre 5% e 30%. Isso permite uma inclinação suficiente para maximizar a captura da luz solar, ao mesmo tempo em que facilita a manutenção e a limpeza dos painéis solares.

Ao observarmos o mapa (Figura 3), é possível constatar que os imóveis analisados na região de Paranaíba estão todos situados dentro da faixa de declividade aceita, onde podemos ver que nenhum ultrapassou a classe 3 da EMBRAPA (de 8 a 20% de declividade). Isso significa que, com base na análise de declividade, podemos afirmar que todos os 2.286 imóveis estudados atendem aos requisitos desejados para a instalação de usinas solares. Portanto, todos eles continuam aptos após essa classificação.

FIGURA 3 - CLASSIFICAÇÃO DE DECLIVIDADE DO TERRENO NO MUNICÍPIO DE PARANAVÁI - PR



FONTE: A autora (2023).

4.2 VEGETAÇÃO

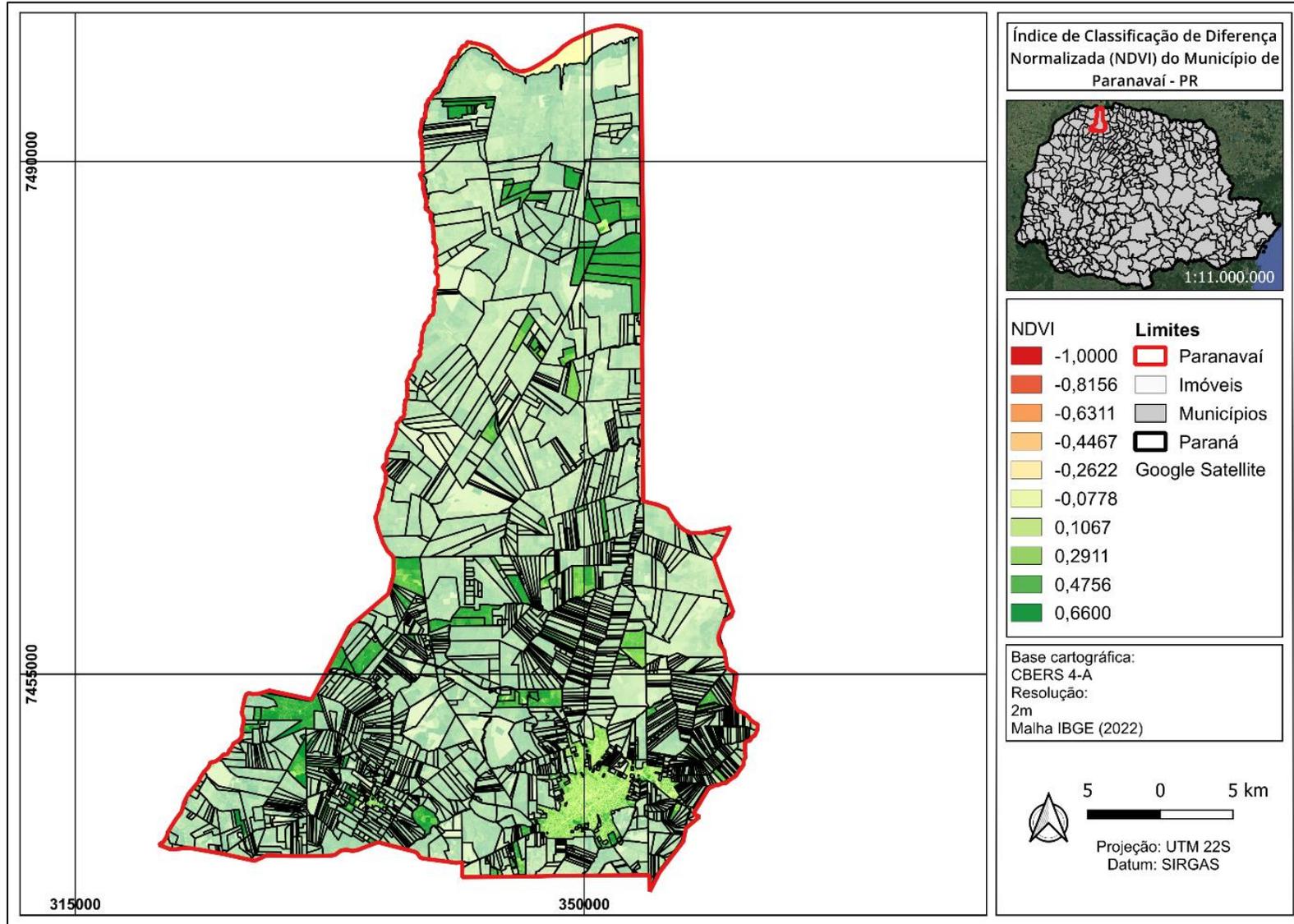
Dos 2.286 imóveis estudados, os resultados da análise de NDVI indicam que 2.167 deles são considerados aptos para a instalação de usinas fotovoltaicas (figura 4). Isso significa que a maioria dos imóveis analisados apresenta uma cobertura vegetal abaixo de 20%, atendendo aos requisitos de área livre de interferências para a implantação das usinas solares.

Esses resultados fornecem informações valiosas para o planejamento e seleção de locais ideais para a instalação das usinas fotovoltaicas na região de Paranaíba. A identificação dos imóveis aptos permite direcionar os esforços para áreas onde a geração de energia solar terá uma maior eficiência e menor impacto ambiental.

É importante ressaltar que os imóveis considerados aptos podem variar em termos de tamanho e localização, e uma análise mais detalhada deve ser realizada levando em conta outros fatores, como acesso à infraestrutura elétrica, viabilidade técnica e questões legais. No entanto, a seleção inicial com base nos critérios de cobertura vegetal fornece uma diretriz útil para a identificação de locais promissores para a instalação das usinas fotovoltaicas.

Dessa forma, os resultados da análise de NDVI confirmam que a região de Paranaíba apresenta uma quantidade significativa de imóveis adequados para a implantação de usinas solares, o que demonstra o potencial dessa área para a expansão da geração de energia limpa e renovável.

FIGURA 4 - ÍNDICE DE CLASSIFICAÇÃO DE DIFERENÇA NORMALIZADA (NDVI) DO MUNICÍPIO DE PARANAÍ - PR

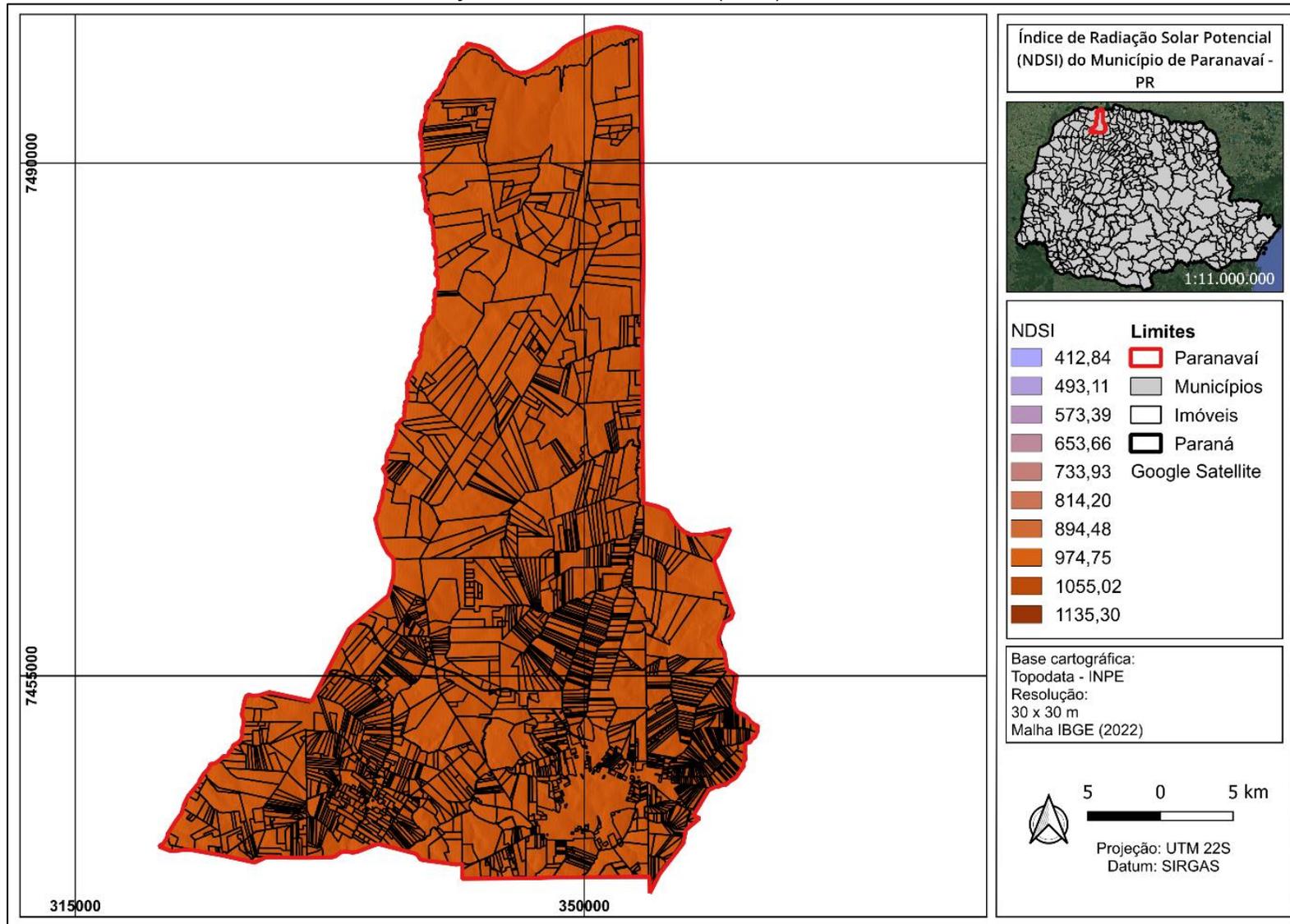


FONTE: A autora (2023)

4.3 INCIDÊNCIA SOLAR

Os resultados obtidos revelaram que todas as regiões analisadas apresentam uma incidência solar diária acima de 900 kWh/m².ano (figura 5). Essa alta incidência solar sugere que todos os imóveis localizados nessas áreas possuem um potencial favorável para a implantação de usinas fotovoltaicas.

FIGURA 5 - ÍNDICE DE RADIAÇÃO SOLAR POTENCIAL (NDSI) DO MUNICÍPIO DE PARANAÍ – PR



FONTE: A autora (2023).

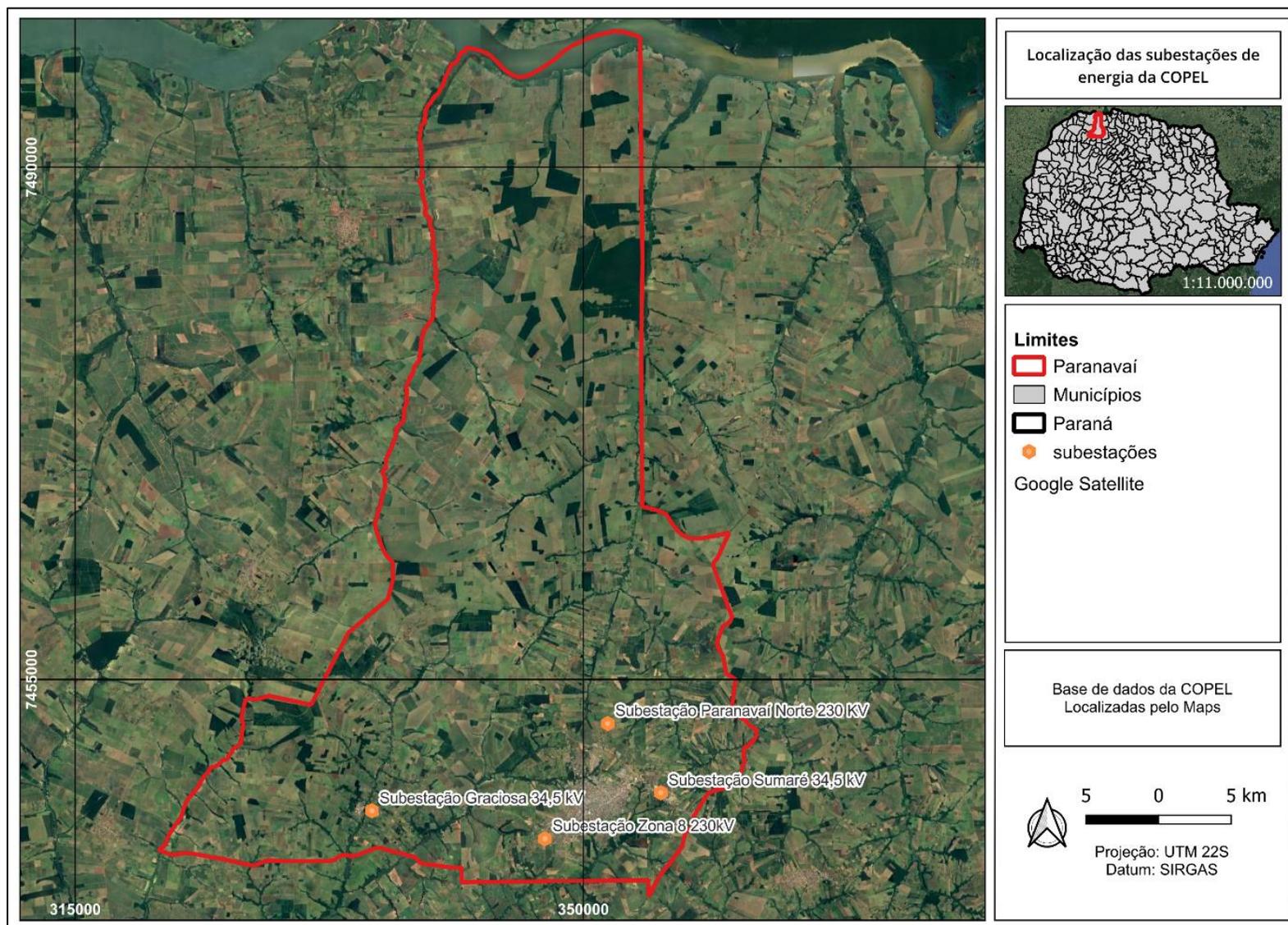
Entretanto é recomendável, que sejam realizados estudos mais aprofundados para avaliar o potencial específico de geração de energia solar em cada imóvel, considerando a presença de obstáculos e outros fatores relevantes. Essa análise mais detalhada permitirá uma compreensão abrangente do potencial de cada local para a instalação de sistemas fotovoltaicos e a maximização da geração de energia solar.

No entanto, a disponibilidade de uma incidência solar tão significativa é um indicativo encorajador para a implementação de usinas fotovoltaicas nos imóveis dessa região. Essa alta exposição à luz solar oferece um potencial promissor para a geração de eletricidade limpa e renovável, reduzindo a dependência de fontes de energia convencionais e contribuindo para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa.

4.4 SUBESTAÇÃO

Para o estudo das subestações, é importante compreender que não há restrições específicas em relação à distância entre as propriedades e as subestações. No entanto, é essencial considerar que essa distância pode afetar a viabilidade de um projeto devido aos custos elevados de conexão entre a usina e a rede elétrica da concessionária. No contexto deste trabalho, foi constatado que as áreas de maior extensão estão localizadas a maiores distâncias das subestações (figura 6). Isso, teoricamente, não representa um grande problema, pois, nesse cenário, a instalação de uma usina de maior porte pode ser viável e os custos associados à sua implantação podem ser justificados.

FIGURA 6 - LOCALIZAÇÃO DAS SUBESTAÇÕES DE ENERGIA DA COPEL



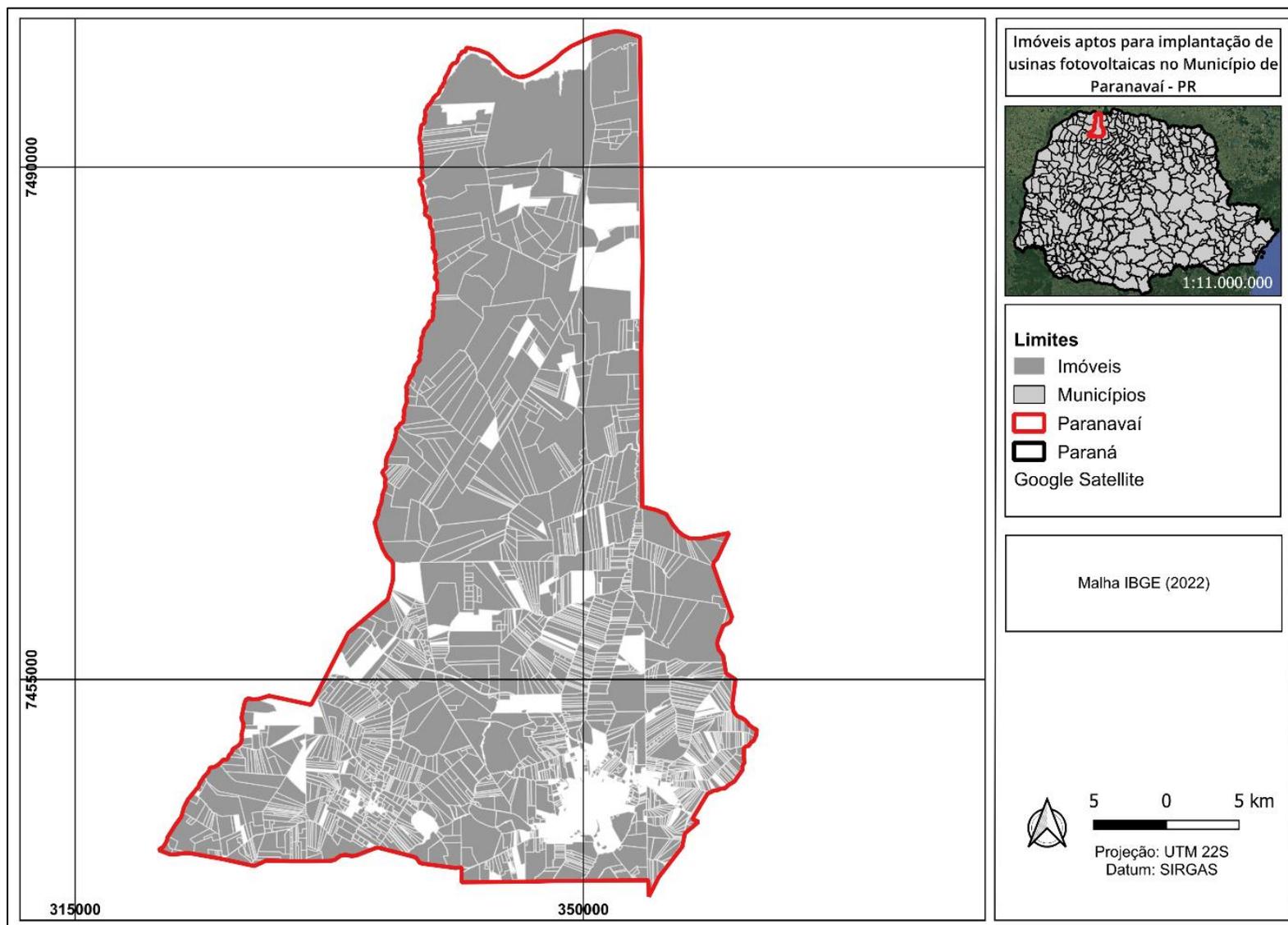
FONTE: A autora (2023).

Dentro do escopo deste estudo, a localização das usinas fotovoltaicas tem como objetivo destacar a existência de uma rede elétrica capaz de suportar a geração de energia a partir dessas usinas. Isso se mostrou positivo, já que o Município possui duas subestações de 230kV e duas de 34,5kV, o que garante potencial energético para conexão com as subestações.

4.5 IMÓVEIS APTOS

Por fim, de acordo com as análises anteriores, podemos observar na figura 7, os imóveis tidos como “aptos” para serem escolhidos para a implantação de usinas em suas áreas.

FIGURA 7 - IMÓVEIS APTOS PARA IMPLANTAÇÃO DE USINAS FOTOVOLTAICAS NO MUNICÍPIO DE PARANAVÁI - PR



FONTE: A autora (2023).

Ao todo, foram observados resultados positivos e condições de implantação em 2.167 imóveis a partir dos parâmetros estudados.

Também é relevante enfatizar que, embora o processamento de dados de incidência solar possa estar desatualizado devido à falta de consideração de barreiras físicas, sua complementação por meio da integração com o mapa de NDVI revelaria as barreiras físicas da vegetação, resultando na redução da incidência solar nos imóveis. Isso levaria ao mesmo desfecho mencionado anteriormente, sem alterar a classificação dos imóveis considerados "aptos".

5 CONCLUSÕES

Com base nos parâmetros analisados neste estudo, conclui-se que as ferramentas de geoprocessamento desempenham um papel fundamental na identificação de áreas com potencial para a implantação de usinas fotovoltaicas. Essa abordagem permite não apenas mapear as áreas mais adequadas, mas também aprimorar o processo de escolha de locais para implantação dessas usinas atualmente adotado pelos empreendedores do ramo. Ao disponibilizar antecipadamente informações sobre os melhores locais, essa ferramenta contribui para uma seleção mais eficiente e direcionada, otimizando o tempo e os recursos dos empreendedores.

Ao considerar os parâmetros analisados neste estudo, verificou-se que o Município de Paranaíba apresenta uma grande extensão de território com aptidão para a instalação de usinas fotovoltaicas. A existência de subestações no Município, indicando uma infraestrutura elétrica adequada, facilita a conexão à rede, resultando em melhor desempenho e aproveitamento das UFVs. A análise da declividade revelou que toda a região de Paranaíba possui condições favoráveis para a instalação das usinas, sem excluir nenhum dos imóveis estudados. Além disso, a incidência solar não apresentou impeditivos significativos, indicando que todos os imóveis estudados possuem exposição adequada à radiação solar.

Apesar de alguns imóveis apresentarem vegetação densa, a utilização do NDVI como parâmetro permitiu identificar e excluir essas áreas menos propícias para a implantação das usinas fotovoltaicas. No entanto, é importante ressaltar que essa exclusão não inviabiliza o potencial geral de Paranaíba para a instalação dessas usinas.

No entanto, é fundamental destacar que essa conclusão se baseia apenas nos parâmetros analisados neste estudo e em suas limitações. Para uma implantação real de usinas fotovoltaicas em Paranaíba, seriam necessários estudos e processos adicionais, incluindo análises econômicas detalhadas, estudos de viabilidade técnica, avaliações ambientais e legais, além de considerações sobre a capacidade de conexão à rede elétrica existente.

Por fim, recomenda-se o desenvolvimento de novos estudos que englobem mais variáveis de influência, visando uma análise mais precisa e fundamentada. A viabilidade real da implantação de usinas fotovoltaicas em Paranaíba dependerá de

estudos complementares, levando em consideração principalmente variáveis técnicas, econômicas, legais e ambientais. Ao aprimorar o processo de seleção de locais por meio do uso de ferramentas de geoprocessamento, é possível impulsionar o desenvolvimento da energia solar no Estado do Paraná, contribuindo para a expansão de matrizes energética limpas e renováveis no país, além de fornecer informações relevantes para tomadas de decisões estratégicas nesse setor.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA. (2020). **Global energy review 2020**. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2020>>. Acesso em 15/06/2023.
- ALMEIDA, A. B. **Energia Hidrelétrica: Aspectos Socioambientais e Potencial Brasileiro**. Rio de Janeiro: Editora XPTO, 2017.
- ALMEIDA, F. **Energia Nuclear: Fundamentos e Aplicações**. São Paulo: Editora ABC, 2018.
- ALMEIDA, F. **Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos e Aplicações**. São Paulo: Editora ABC, 2019.
- ALMEIDA, F. **Matrizes Energéticas e Sustentabilidade**. São Paulo: Editora ABC, 2019.
- ALY, A., JENSEN, S.S., PEDERSEN, A.B., (2017). **Solar power potential of Tanzania: Identifying CSP and PV hot spots through a GIS multicriteria decision making analysis**. *Renew. Energy* 113, 159–175. Disponível em: <<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.077>>. Acesso em 15/06/2023.
- AMARAL, S., OLIVEIRA, L., & SOUZA, A. (2020). **Energia solar: conceitos e aplicações**. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, 9(2), 150-162.
- BASTOS, R. **Energia Eólica: Potencial e Perspectivas no Brasil**. São Paulo: Editora ABC, 2017.
- BATISTA, P. V. G., PINHEIRO, E. S., ROCHA, C. P. R., & SANTOS, G. L. (2018). **Avaliação do potencial de geração de energia solar fotovoltaica no Noroeste do Paraná**. *Revista Tecnologia e Ambiente*, 24(1), 27-42.
- BRAGA, C. A. et al. **Energia Hidrelétrica e o Desenvolvimento Sustentável**. São Paulo: Editora ABC, 2019.
- BRASIL. Lei nº 11.428, (2006). **Dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do Bioma Mata Atlântica**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 26 dez. 2006. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2006/lei/l11428.htm. Acesso em: 29/06/2023.
- CÂMARA, G., DAVIS JR, C. A., & MONTEIRO, A. M. V. (2001). **Introdução à ciência da geoinformação**. São José dos Campos: INPE.
- CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M.; et al. **Introdução à Ciência da Geoinformação. [s.l.]**: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2002).
- CARVALHO, D. S. **Impactos Ambientais das Usinas Hidrelétricas**. Belo Horizonte: Editora DEF, 2018.

CELESTINO, V. da S.; JULIÃO, R. P. **Aplicação geográfica na identificação de áreas com potencial para gerar energia por fontes renováveis**. Revista Brasileira de Cartografia, [S. l.], v. 69, n. 3, 2017. DOI: 10.14393/rbcv69n3-44343. Disponível em: <<https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/44343>>. Acesso em: 30/06/2023.

CHAUREY, A.; KANDPAL, T. C. **Assessment and evaluation of PV based decentralized rural electrification: An overview**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 14, p. 2266-2278, 2010.

COPEL. **Companhia Paranaense de Energia**. Disponível em: <<http://www.copel.com>>. Acesso em 11/06/2023.

COPEL. **Distribuição**. Disponível em: <<https://www.copel.com/hpcopel/root/site/copel/comphnia/atuacao/distribuicao>>. Acesso em 15 de junho de 2023.

COPEL. **Energia Renovável**. Disponível em: <<https://www.copel.com/hpcopel/root/site/copel/comphnia/sustentabilidade/energia-renovavel>>. Acesso em 15 de junho de 2023.

COPEL. **Linhas e Subestações**. Disponível em: <<https://www.copel.com/site/copel-transmissao/linhas-e-subestacoes>>. Acesso em 12/06/2023.

COPEL. **Pesquisa e Desenvolvimento**. Disponível em: <<https://www.copel.com/hpcopel/root/site/copel/comphnia/inovacao-e-qualidade/pesquisa-e-desenvolvimento>>. Acesso em 15 de junho de 2023.

COPEL. **Responsabilidade Socioambiental**. Disponível em: <<https://www.copel.com/hpcopel/root/site/copel/comphnia/sustentabilidade/responsabilidade-socioambiental>>. Acesso em 15 de junho de 2023.

COPEL. **Sobre a COPEL**. Disponível em: <<https://www.copel.com/hpcopel/root/site/copel/comphnia/institucional-historico-mensagem-presidente>>. Acesso em 15 de junho de 2023.

COSTA, A. B.; SANTOS, L. M.; OLIVEIRA, R. C. **Análise da incidência solar utilizando geoprocessamento para a seleção de locais propícios à implantação de usinas fotovoltaicas**. Revista Brasileira de Energias Renováveis, v. 15, n. 1, p. 56-68, 2022.

COSTA, W. S., NASCIMENTO, A. L. B., & REIS, A. (2015). **Composição florística e estrutura do componente arbóreo de uma área de floresta estacional semidecidual em Nova Esperança - PR**. Floresta.

DENHOLM, P., & MARGOLIS, R. M. (2017). **Evaluating the limits of solar photovoltaics (PV) in traditional electric power systems**. Energy Policy.

EMBRAPA, (2006). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 1º Edição. Brasília, DF.

EPE, 2017. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2026**.

FERNANDES, R. M. **Desenvolvimento Regional e Hidrelétricas no Brasil**. Brasília: Editora Nacional, 2020.

FERREIRA, R. M., ROCHA, J. V., CARVALHO, D. F., & LEITE, G. D. (2015). **Geoprocessamento aplicado à agricultura: conceitos básicos**. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*.

FERREIRA, R. S. **Acidentes Nucleares: Consequências e Lições Aprendidas**. Rio de Janeiro: Editora XPTO, 2017.

FERREIRA, R. S. **Impactos Ambientais das Usinas Termoeletricas**. Rio de Janeiro: Editora XPTO, 2017.

GALVÃO, L. S., BATISTELLA, M., & BERTRAND, G. (2009). **Sensoriamento remoto e geoprocessamento na gestão ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos.

GOMES, A. B. **Gestão de Resíduos Radioativos: Desafios e Perspectivas**. São Paulo: Editora DEF, 2020.

GOMES, A. B. **Poluição Atmosférica e Usinas Termoeletricas**. São Paulo: Editora DEF, 2018.

GUPTA, H., & KUMAR, A. (2018). **A review on solar energy and solar PV technologies**. *International Journal of Energy Research*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2018.

IBGE. (2004). **Mapa de Vegetação do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE.

IBGE. **Panorama | Paranaíba – PR**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pr/paranaiba/panorama>>. Acesso em 15/05/2023.

JENSEN, J. R. **Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective**. 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2007.

LI, J., GENG, R., ZHANG, Y., XIA, H., WU, X., & HAN, H. (2021). **Technological and economic analysis of photovoltaic technologies**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 137, 110647.

LI, W., HUANG, S., GAO, Y., ZHANG, X., & YU, Y. (2018). **Soil classification for photovoltaic power plant site selection using remote sensing imagery**. *Energies*, 11(4), 911.

LIMA, M. P. **Energia Solar Fotovoltaica: Aspectos técnicos, econômicos e ambientais**. (2019). Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de São João Del-Rei, São João Del-Rei, 2019.

LIMA, V. R.; SANTOS, M. A.; ALMEIDA, P. C. **Identificação de áreas com menor incidência solar utilizando geoprocessamento para a implantação de usinas**

fotovoltaicas. In: Congresso Brasileiro de Geomática, 8., 2019, Curitiba. Anais do Congresso Brasileiro de Geomática, p. 127-139, 2019.

MAC EACHREN, A. M.; KRAAK, M. J.; ORLOVSKY, N. P. **Exploring Geovisualization.** [s.l.]: Elsevier, 2005.

MENDOZA-VIZCAINO, J., VARELA, M., TERUEL-SOLANO, J., & AYALA-NUNEZ, N. (2021). **A review of the economic analysis of photovoltaic power systems.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, 137, 110555.

OLIVEIRA, F. S.; SANTOS, R. S.; LIMA, M. S. **Utilização do geoprocessamento na análise da vegetação para a implantação de usinas fotovoltaicas.** Revista Brasileira de Energias Renováveis, v. 12, n. 2, p. 456-468, 2020.

OLIVEIRA, L. M. **Combustíveis Fósseis: Desafios e Perspectivas.** Brasília: Editora Nacional, 2018.

OLIVEIRA, L. M. **Proliferação Nuclear e Segurança Internacional.** Brasília: Editora Nacional, 2019.

OLIVEIRA, R. M., SILVA, A. L., & SANTOS, F. C. (2021). **Caracterização do uso do solo no Núcleo Regional de Paranavaí.** Revista de Geografia Agrária, 19(2), 32-48.

OPENSHAW, S.; ABRAHART, R. M. **Geographical Information and Planning.** [s.l.]: Springer, 2000.

O'SULLIVAN, D.; UNWIN, D. J. **Geographic Information Analysis.** 2nd ed.

PEREIRA, M. S. **Energia Nuclear: Avanços e Desafios.** Rio de Janeiro: Editora XPTO, 2019.

PEREIRA, M. S. **Energia Renovável e Mudanças Climáticas.** Rio de Janeiro: Editora XPTO, 2020.

PEREIRA, M. S. **Mudanças Climáticas e Matrizes Energéticas.** Rio de Janeiro: Editora XPTO, 2020.

PEREIRA, M.G., CAMACHO, C.F., FREITAS, M.A.V., DA SILVA, N.F., (2012). **The renewable energy market in Brazil: Current status and potential.** Renew. Sustain. Energy Rev. 16, 3786–3802. Disponível em: <<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.024>>. Acesso em 15/06/2023.

QGIS (versão 3.3.30). Global, (2023). Disponível em: <https://qgis.org/pt_BR/site/>.

QUEIROZ NETO, J. P. (2005). **Análise espacial com o uso de geoprocessamento.** In: Carvalho, M. S., Moraes, A. P. (Eds.). Geoprocessamento e análise ambiental (pp. 29-60). Curitiba: Editora da UFPR.

REDISKE et al. **Nível de importancia decriterios na tomada de decisao quanto a localização de usinas fotovoltaicas.** Disponível em: <

<https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/download/1020/1020>>. Acesso em 15/06/2023.

ROCHA, F. C. **Energia Eólica: Aspectos Técnicos e Desafios**. São Paulo: Editora DEF, 2019.

ROCHA, J. V., FERREIRA, R. M., & LEITE, G. D. (2012). **Aplicações do geoprocessamento no monitoramento ambiental**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.

RODRIGUES, F. M.; SILVA, J. P.; GOMES, M. R. **Utilização do geoprocessamento na análise integrada da incidência solar, topografia e cobertura vegetal para a seleção de áreas para usinas fotovoltaicas**. Anais do Congresso Brasileiro de Energia Solar, p. 324-337, 2020.

ROUSE JR., J. W., HAAS, R. H., SCHELL, J. A., & DEERING, D. W. (1973). **Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation** (No. E74-10079). NASA: Greenbelt, MD.

SANTOS, A. B.; SILVA, L. M.; MACHADO, P. A. **Deteção de áreas de vegetação densa para a implantação de usinas fotovoltaicas utilizando geoprocessamento**. Anais do XX Congresso Brasileiro de Geomática, p. 789-799, 2019.

SANTOS, J. L. **Impactos Socioambientais de Hidrelétricas no Brasil**. Curitiba: Editora GHI, 2019.

SANTOS, J. R. **Energia Nuclear: Contribuição para a Segurança Energética**. Curitiba: Editora GHI, 2021.

SANTOS, J. R. **Energia Termoelétrica: Fundamentos e Aplicações**. Curitiba: Editora GHI, 2018.

SANTOS, J. R. **Impactos Ambientais dos Parques Eólicos**. Curitiba: Editora GHI, 2016.

SANTOS, L. M., SOUZA, R. C., & MENDES, A. M. (2020). **Uso do solo e desenvolvimento socioeconômico no Núcleo Regional de Paranavaí**. Revista de Desenvolvimento Regional, 5(2), 71-88.

SANTOS, R. S., REZENDE, L., RODRIGUES, G. C., & FISCH, G. (2012). **Variabilidade da Radiação Solar no Estado do Paraná**. Revista Brasileira de Meteorologia, 27(1), 11-20.

SANTOS, S. C., OLIVEIRA, G. B., & ROCHA, C. M. (2015). **Classificação supervisionada de declividade para identificação de áreas propícias ao desenvolvimento agrícola na região norte do Espírito Santo**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 19(6), 571-578.

SILVA, A. B. **Energia Eólica e Conservação da Fauna**. Brasília: Editora Nacional, 2017.

SILVA, A. B., Souza, C. D., & Santos, E. F. (2019). **Energia Hidrelétrica: Potencial e Desafios**. Revista Brasileira de Energia, 26(2), 45-60.

SILVA, C. L.; SANTOS, J. M.; LIMA, F. R. **Geoprocessamento aplicado na análise da vegetação para o planejamento de usinas fotovoltaicas**. In: **Congresso Brasileiro de Energia Solar**, 5., 2021, São Paulo. Anais do Congresso Brasileiro de Energia Solar, p. 123-134, 2021.

SILVA, J. M., SANTOS, M. T., LIMA, J. A., & ALVES, M. (2020). **Geospatial analysis for the identification of potential areas for photovoltaic solar power plants**. *Energies*, 13(17), 4377.

SILVA, J. R., SANTOS, M. S., & ALMEIDA, G. C. (2019). **A localização estratégica do Núcleo Regional de Paranavaí**. Revista Brasileira de Geografia Regional, 22(3), 97-116.

SILVA, M. P. **Desastres Naturais em Áreas Hidrelétricas**. São Paulo: Editora QWERT, 2016.

SMITH, J. M., & TAYLOR, N. J. (2019). **Photovoltaics: Technology overview**. In Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials (pp. 378-385). Elsevier.

SOUZA, F. C., SANCHES, I. D., & CARVALHO, D. F. (2018). **Geotecnologias e agricultura de precisão: princípios e aplicações**. Ponta Grossa: Atena.

TESKE, S., (2010). **Revolução Energética: A caminho do desenvolvimento limpo**. Uyan, M., 2017. **Optimal site selection for solar power plants using multi-criteria evaluation: A case study from the Ayranci region in Karaman, Turkey**. Clean Technol. Environ. Policy 19, 2231–2244.

YANG, D., LI, Y., ZHANG, W., ZHANG, L., & HAO, Y. (2020). **Progress and prospects of perovskite solar cells: Flexible and monolithic perovskite solar cells**. Journal of Power Sources, 452, 227856.

ZHAI, J., HE, Y., ZHAO, X., & WANG, L. (2019). **Multi-objective optimization of photovoltaic power station sites based on GIS and analytic hierarchy process**. Applied Energy, 239, 935-947.

ZHENG, Y., YU, C., & DENG, Y. (2019). **Research and development of solar photovoltaic industry in China: A review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 113, 109