



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS



PAULO DE TARSO DANTAS LIMA

**ANÁLISE DOS PROCESSOS DE AVALIAÇÃO DE
IMPACTO AMBIENTAL EM USINAS FOTOVOLTAICAS
E O POTENCIAL BIOFÍSICO NO NORDESTE DO
BRASIL**

JOÃO PESSOA - PB
2021

PPGER / MESTRADO ACADÊMICO / Nº XX

PAULO DE TARSO DANTAS LIMA

**ANÁLISE DOS PROCESSOS DE AVALIAÇÃO DE IMPACTO
AMBIENTAL EM USINAS FOTOVOLTAICAS E O POTENCIAL
BIOFÍSICO NO NORDESTE DO BRASIL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, área de concentração em Energias Renováveis, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. Raphael Abrahão, PhD

**JOÃO PESSOA - PB
2021**



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS



ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

ATA nº 83 da Sessão de Defesa de Dissertação do Mestrado Acadêmico do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, Universidade Federal da Paraíba.

Ao trigésimo dia do mês de agosto de dois mil e vinte e um foi instalada a Banca de Defesa de Dissertação do Mestrado Acadêmico do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas em Home Office, às 14h00, via Google Meet (meet.google.com/qun-evex-jpa) a que se submeteu a defesa pública PAULO DE TARSO DANTAS LIMA, matrícula 20191011857, com o título “**ANÁLISE DOS PROCESSOS DE AVALIAÇÃO DE IMPACTO AMBIENTAL EM USINAS FOTOVOLTAICAS E O POTENCIAL BIOFÍSICO NO NORDESTE DO BRASIL**”. A Comissão Examinadora esteve constituída pelos professores: RAPHAEL ABRAHAO (UFPB), ROGERIO SANTANA PERUCHI (UFPB), JOSE FELIX DA SILVA NETO (UFPB). Concluídos os trabalhos de apresentação e arguição, o(a) candidato(a) foi**APROVADO**.... pela Comissão Examinadora. E, para constar, foi lavrada a presente ata, assinada pelos membros da Comissão.

Observações: As sugestões da Banca de Defesa serão seguidas.

Membros da Banca Examinadora:

Prof. Dr. RAPHAEL ABRAHAO
Orientador(a)

Prof. Dr. ROGERIO SANTANA PERUCHI - UFPB
Examinador(a) Interno(a)

Prof. Dr. JOSE FELIX DA SILVA NETO - UFPB
Examinador(a) Externo(a)

PPGER/CEAR/UFPB - Campus I, Caixa Postal 5115, CEP: 58051-900, João Pessoa - PB, Brasil.

Obs.(1): O discente deverá encaminhar a coordenação do PPGER, no prazo máximo de 45 dias a contar da data da defesa, os exemplares definitivos da dissertação.

Obs.(2): O docente deverá encaminhar a coordenação do PPGER, no prazo máximo de 20 dias a contar da data da defesa, o relatório de orientação para avaliação do colegiado.

Ficha Catalográfica

Catálogo de Publicação na Fonte. UFPB – Biblioteca Central
Seção de Catalogação e Classificação

L732a Lima, Paulo de Tarso Dantas.

Análise dos processos de avaliação de impacto ambiental em usinas fotovoltaicas e o potencial biofísico no Nordeste do Brasil. / Paulo de Tarso Dantas Lima. - João Pessoa, 2021.
79 f. : il.

Orientação: Raphael Abrahão.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Energia solar. 2. Energia fotovoltaica. 3. Impactos ambientais. 4. Estudos ambientais. 5. Caracterização biofísica.
I. Abrahão, Raphael. II. Título.

UFPB/BC

CDU 551.521.37(043)

PAULO DE TARSO DANTAS LIMA

**ANÁLISE DOS PROCESSOS DE AVALIAÇÃO DE IMPACTO
AMBIENTAL EM USINAS FOTOVOLTAICAS E O POTENCIAL
BIOFÍSICO NO NORDESTE DO BRASIL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, área de concentração em energias renováveis, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. Raphael Abrahão

**JOÃO PESSOA - PB
2021**

DEDICATÓRIA

À minha família por todo o apoio.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Raphael Abrahão pela orientação, compreensão e paciência.

RESUMO

A geração de eletricidade por sistemas fotovoltaicos vem crescendo exponencialmente em todo o mundo. A implantação desse tipo de atividade requer a elaboração de diversos estudos, dentre eles, a Avaliação de Impacto Ambiental (AIA). Logo, é imperativo o aperfeiçoamento dessa ferramenta, por ser o principal instrumento na garantia da promoção do desenvolvimento sustentável no segmento. Outro processo a ser aperfeiçoado é a tomada de decisão quanto às áreas de instalação dos empreendimentos fotovoltaicos, que pode ocorrer mediante o uso de sistemas de informações geográficas e critérios geoambientais, considerando ainda os aspectos socioeconômicos, entre outros. Desta forma, este trabalho tem por objetivo avaliar a qualidade e aplicabilidade das AIAs aos empreendimentos fotovoltaicos, a partir da identificação dos impactos benéficos e adversos e da mensuração do potencial biofísico da região Nordeste. Para tanto, empregou-se a pesquisa documental, através da análise de 41 AIAs, por meio dos quais foi possível identificar 3381 impactos, subdivididos nas fases de planejamento, implantação, operação e desativação dos projetos. Já em relação ao potencial biofísico, este foi calculado a partir de três critérios ambientais: declividade média do terreno, classes de cobertura do solo e a irradiação solar global horizontal (IGH). Verificou-se que 75% dos impactos são previstos para ocorrer ao longo da implantação dos empreendimentos. Ao analisar os compartimentos ambientais, percebe-se que 82% e 76,5% dos impactos incidentes sobre os meios bióticos e abióticos, respectivamente, são negativos. Já no meio socioeconômico, 72,2% se mostram positivos. O potencial biofísico indicou elevada viabilidade ambiental para a produção de energia fotovoltaica, dada as condições favoráveis de declividade, alta IGH e classes de cobertura do solo compatíveis com a atividade. Dessa maneira, somente 5,47% do território ambientalmente inviável; 9,58% apresenta viabilidade entre 37,7% e 58,4%; em 27,88% o potencial variou entre 58,4 e 79,0%; enquanto 57,07% mostrou-se apto, com até 99,7%. A quantificação histórica dos impactos ambientais pode ser utilizada para avaliar o benefício da atividade nas cidades e regiões, e, pontuar os impactos de maior relevância. Também foi possível observar que alguns impactos referenciados na literatura internacional não estão previstos nas AIAs estudadas, fato que pode comprometer a tomada de decisão por parte do poder público. Quanto à viabilidade ambiental da geração de energia fotovoltaica, a partir de parâmetros biofísicos, verificou-se que a região Nordeste possui um elevado potencial em quase todo o seu território. Com vistas ao desenvolvimento sustentável desta região, é pertinente promover a identificação de áreas adequadas para a geração da energia fotovoltaica, uma vez que permite o planejamento da transmissão, fornece subsídios para a elaboração de planos, programas e políticas públicas; amplia as certezas do mercado da energia solar e resguarda as áreas ambientalmente sensíveis, de modo a consorciar à geração de energia fotovoltaica à minimização de impactos ambientais indesejados.

Palavras-Chave: Energia Fotovoltaica; Energia Solar; Impactos Ambientais; Estudos Ambientais; Caracterização Biofísica.

ABSTRACT

Electricity generation by photovoltaic systems has been growing exponentially all over the world. The implementation of this type of activity requires the preparation of several studies, including the Environmental Impact Assessment (EIA). Therefore, it is imperative to improve this tool, as it is the main instrument in ensuring the promotion of sustainable development in the segment. Another process to be improved is decision-making regarding the installation areas of photovoltaic projects, which can occur through the use of geographic information systems and environmental criteria, also considering socioeconomic aspects, among others. Thus, this work aims to evaluate the quality and applicability of EIAs to photovoltaic projects, from the identification of beneficial and adverse impacts and the measurement of the biophysical potential of the Northeast region. For that, documental research was used, through the analysis of 41 EIAs, through which it was possible to identify 3381 impacts, subdivided in the planning, implantation, operation and deactivation phases of the projects. Regarding the biophysical potential, this was calculated based on three environmental criteria: average land slope, land cover classes and global horizontal solar irradiation (GSI). It was found that 75% of the impacts are expected to occur during the implementation of the projects. When analyzing the environmental compartments, it is noticed that 82% and 76.5% of the impacts incident on the biotic and abiotic environments, respectively, are negative. In the socioeconomic environment, 72.2% are positive. The biophysical potential indicated high environmental viability for the production of photovoltaic energy, given the favorable conditions of slope, high GSI and land cover classes compatible with the activity. Thus, only 5.47% of the territory is environmentally unviable; 9.58% have viability between 37.7% and 58.4%; in 27.88% the potential ranged between 58.4 and 79.0%; while 57.07% proved fit, with up to 99.7%. The historical quantification of environmental impacts can be used to assess the benefit of the activity in cities and regions, and to score the most relevant impacts. It was also possible to observe that some impacts referenced in the international literature are not foreseen in the EIAs studied, a fact that can compromise decision-making by the government. As for the environmental feasibility of photovoltaic energy generation, based on biophysical parameters, it was found that the Northeast region has a high potential in almost all of its territory. With a view to the sustainable development of this region, it is pertinent to promote the identification of suitable areas for the generation of photovoltaic energy, since it allows transmission planning, provides subsidies for the elaboration of plans, programs and public policies; it expands the certainties of the solar energy market and protects environmentally sensitive areas, in order to combine the generation of photovoltaic energy with the minimization of unwanted environmental impacts.

Keywords: Environmental impact study; Photovoltaics; Solar energy; Geographic Information Systems; Resource Mapping.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ilustração da declinação solar.	22
Figura 2: Interação da radiação solar com a atmosfera terrestre.	23
Figura 3: Irradiação solar típica no Nordeste do Brasil.....	26
Figura 4: Mapa de localização das usinas fotovoltaicas em operação e em construção no Nordeste do Brasil no ano de 2020.....	37
Figura 5: Quantitativo e porcentagem dos impactos ambientais por etapa do empreendimento fotovoltaico na região Nordeste.....	47
Figura 6: Quantitativo e porcentagem dos impactos ambientais por meio.....	47
Figura 7: Quantitativo dos impactos ambientais das usinas fotovoltaicas da região Nordeste por componente para os subgrupos fauna e flora.....	48
Figura 8: Impactos ambientais das usinas fotovoltaicas do Nordeste prognosticados para o meio biótico por fase.	49
Figura 9: Quantitativo dos impactos ambientais das usinas fotovoltaicas da região Nordeste por componente para o meio físico. SO = Solo. CQA = Clima e Qualidade do	51
Figura 10: Impactos ambientais das usinas fotovoltaicas do Nordeste prognosticados para o meio físico em relação às fases da atividade.	51
Figura 11: Quantitativo dos impactos ambientais das usinas fotovoltaicas da região Nordeste por componente para o meio socioeconômico.	54
Figura 12: Impactos ambientais das usinas fotovoltaicas do Nordeste prognosticados para o meio socioeconômico, em relação às fases do empreendimento.....	55
Figura 13: Síntese dos resultados obtidos a partir da análise dos EIA.	57
Figura 14: Mapa de declividade da região Nordeste.	58
Figura 15: Mapa de irradiação global horizontal do Nordeste do Brasil.....	60
Figura 16: Mapa de classificação de cobertura do solo (NDVI) da região Nordeste do Brasil.....	62
Figura 17: Mapa de potencial biofísico para geração de energia fotovoltaica no Nordeste do Brasil.....	65
Figura 18: Interação entre os componentes do PBioFV e os subgrupos de impactos. ...	66
Figura 19: Potencial biofísico das áreas ocupadas pelas usinas fotovoltaicas em operação e construção no Nordeste do Brasil.	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Descrição das ferramentas de AIA.	29
Tabela 2: Descrição dos métodos e critérios utilizados para determinação de áreas adequadas para a instalação de usinas fotovoltaicas.	33
Tabela 3: Classificação dos critérios.	34
Tabela 4: Lista de verificação utilizada para coleta e parametrização dos dados ambientais.	39
Tabela 5: Intervalos e classes de declividade média do relevo.	41
Tabela 6: Classes atribuídas ao NDVI.	43
Tabela 7: Padronização do NDVI.	43
Tabela 8: Relação dos estudos ambientais de usinas fotovoltaicas por estado do Nordeste, tipo de estudo e ano de elaboração.	46
Tabela 9: Classificação da declividade da região Nordeste.	58
Tabela 10 Classes de cobertura do solo.	63
Tabela 11: Padronização da cobertura do solo.	63
Tabela 12: Intervalos do potencial biofísico para geração de energia fotovoltaica.	64

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

%	Porcentagem
ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
AIA	Avaliação de Impacto Ambiental
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
APP	Área de Preservação Permanente
ASIL	Aspectos Sociais e Infraestrutura local
AT	Arrecadação Tributária
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
D	Declividade do terreno
Dr	Doutor
EIA	Estudos de Impactos Ambientais
ELR	Economia local e regional
EM	Empregos
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ER	Elementos Restritivos
EUA	Estados Unidos da América
FA	Fauna
FGRP	<i>Fuzzy grey relational projection</i>
FL	Flora
GEO	Geomática
GW	Gigawatt
GWh	Gigawatt-hora
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA	International Energy Agency
IGH	Irradiação Global Horizontal
IGSC	Impactos genéricos sem classificação
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IRENA	International Renewable Energy Agency
km ²	Quilômetro quadrado
kW	Kilowatt
m ²	Metro quadrado
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDMC	Métodos de Decisão Multicritério
MME	Ministério de Minas e Energia
MODIS	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>

NEPA	<i>National Environmental Policy Act</i>
NIR	Infravermelho próximo
Nº	Número
OTE	Ordenamento territorial e energia
PA	Paisagem
PB	Paraíba
PBioFV	Potencial biofísico para geração de energia fotovoltaica
Prof	Professor
QGIS	Quantum GIS
RAS	Relatório Ambiental Simplificado
RED	Vermelho
RH	Recursos hídricos
RIMA	Relatório de Impactos Ambientais
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SIGEL	Sistema de Informação Geográficas do Setor Elétrico
SNUC	Sistema Nacional de Unidades de Conservação
SO	Solo
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
SSP	Saúde e Segurança da População
SST	Saúde e Segurança no Trabalho
TOPSIS	<i>Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution</i>
UC	Unidades de Conservação
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
UFV	Usinas fotovoltaicas
USGS	United States Geological Survey
Wh	Watt-hora

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVOS	18
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1 FONTES DE ENERGIAS RENOVÁVEIS	20
2.2 A ENERGIA SOLAR	21
2.2.1 Radiação solar.....	22
2.2.2 Aproveitamento da energia solar	23
2.3 ENERGIA SOLAR NO BRASIL	25
2.4 AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS	26
2.5 IMPACTOS AMBIENTAIS DECORRENTES DAS USINAS FOTVOLTAICAS	30
2.6 AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA FOTVOLTAICA	32
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1 ÁREA DE ESTUDO	37
3.2 ANÁLISE DOS ESTUDOS DE IMPACTOS AMBIENTAIS	38
3.3 POTENCIAL BIOFÍSICO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA FOTVOLTAICA	40
3.3.1 Declividade	40
3.3.2 Irradiação Global Horizontal	41
3.3.3 Classes de cobertura do solo	42
3.3.4 Elementos restritivos.....	43
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
4.1 ANÁLISE DAS AVALIAÇÕES DE IMPACTOS AMBIENTAIS	46
4.1.1 Catalogação e categorização das AIAs de usinas fotovoltaicas no Nordeste do Brasil.....	46
4.1.2 Meio biótico	48
4.1.3 Meio físico	50
4.1.4 Meio socioeconômico	53

4.2 POTENCIAL BIOFÍSICO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA	57
4.2.1 Declividade	57
4.2.2 Irradiação Global Horizontal	60
4.2.3 Cobertura do solo.....	61
4.2.4 Potencial biofísico.....	64
CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	68
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

As energias renováveis estão em ascensão, visando, principalmente, a redução da dependência dos combustíveis fósseis e a mitigação dos impactos das mudanças climáticas (IPCC, 2011; AZÊVEDO; CANDEIAS; TIBA, 2017). A geração de eletricidade a partir da luz solar, como é o caso dos sistemas de energia solar fotovoltaica, vem crescendo exponencialmente em todo o mundo (IPCC, 2018), atingindo a marca de 500 GW de potência instalada no mundo em 2019 (IRENA, 2019) e de 707 GW em 2021 (IRENA, 2021).

As estimativas de geração de eletricidade a partir da fonte fotovoltaica para 2025 são ainda mais impressionantes, uma vez que se espera atingir cerca de 1.513 GW em escala global (IEA, 2020). No Brasil, esse segmento vem crescendo de maneira substancial, passando de 4.2 GW para 7.4 GW no período de 2019 e 2020, embora ainda possua uma baixa representatividade (de 1,7%) na matriz energética do país (MME, 2021). Em 2021, de acordo com a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR, 2021), a potência instalada total no país alcançou 8,47 GW dos quais, aproximadamente, 39% derivam da geração centralizada e 61% da geração distribuída.

Ao passo em que a energia fotovoltaica se expande com intensa rapidez, é imperativo o aperfeiçoamento da aplicação da Avaliação de Impacto Ambiental (AIA) enquanto uma ferramenta de alavancagem do desenvolvimento sustentável da atividade, sob os pilares econômico, ambiental e social. Desta forma, demonstrar com clareza os impactos benéficos e adversos ao longo da operação de usinas fotovoltaicas é uma questão ainda mais emergente.

Desde sua origem, a AIA se estabeleceu como um procedimento de gestão ambiental aceito mundialmente, seja para avaliar as consequências ambientais de determinada decisão, para implementar políticas e planos ambientais ou para iniciar o desenvolvimento de projetos. Essa ferramenta tem sido aceita em diversos países, incluindo o Brasil, com diferentes níveis de aplicação, e vem evoluindo ao longo do tempo com metodologias mais sofisticadas (SÁNCHEZ, 2008).

A AIA é descrita por Braga *et al.* (2005) como o processo para identificar as prováveis consequências no ambiente biofísico, na saúde e no bem-estar humano, advindas da implementação de determinada atividade, compilando essas informações de maneira que os responsáveis pela tomada de decisão possam aprovar ou não determinado projeto. De acordo com Caldas (2019), também deve analisar os efeitos socioeconômicos,

objetivando a avaliação completa do projeto e suas relações. Entretanto, a maior deficiência da maioria das avaliações de impacto ambiental consiste em estabelecer o período em que cada impacto é provável de ocorrer (SÁNCHEZ, 2008).

A dificuldade de estabelecer o período de ocorrência de cada impacto em relação à fase do projeto geralmente acarreta incertezas no processo de avaliação de impacto ambiental. A incerteza na previsão pode ser reduzida a partir da pesquisa, apesar de ser um componente inevitável em qualquer estudo de previsão. Na AIA, o objetivo é fornecer informações das mudanças (impactos) que ocorrerão a partir da implementação de determinada atividade ou projeto (GARCIA, 2014).

Ao tratar especificamente da geração de energia fotovoltaica, outra questão a ser destacada diz respeito à adequação do projeto às condicionantes impostas pelo ambiente. Tal postura pode contribuir para a redução dos impactos e locação ótima das instalações fotovoltaicas (REDISKE *et al.*, 2019). Neste sentido, nota-se que o processo de seleção das áreas destinadas à geração de energia fotovoltaica se configura um fator de grande valia para a mitigação e redução de impactos ambientais adversos, bem como, para a otimização do sistema de produção de energia elétrica (YOUSEFI; HAFEZNIA; SAHZABI, 2018).

Assim, se faz necessário adotar critérios diversos: ambientais, econômicos, sociais e técnicos (AL-SHAMMARI *et al.*, 2021). Estes, por sua vez, necessitam ser manipulados espacialmente, processo que costuma ocorrer por meio de Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) (LI; XU; LI, 2020). Ao encontro desta questão, Yousefi, Hafeznia e Sahzabi (2018) afirmaram que as análises espaciais em prol da adequação das fontes de energia renovável findaram por se tornar uma área de estudo muito popular nos últimos anos.

O SIGs podem ser entendidos como sistemas de informações desenvolvidos para o processamento de informações digitais. Logo, configuram uma rede que interrelaciona pessoas, informações geográficas, *softwares*, *hardwares* e procedimentos (AZÊVEDO; CANDEIAS; TIBA, 2017). Acerca do uso dos SIGs, estes permitem a redução de perdas de energia e a minimização de impactos ambientais, viabiliza a sobreposição de mapas, considerando possíveis restrições e confere maior robustez à avaliação da capacidade de geração (LI; XU; LI, 2020).

Estudos desenvolvidos em diversas localidades do planeta, por meio da análise espacial, avaliam aspectos ambientais, econômicos e sociais diversos, com a finalidade de conferir maior robustez, viabilidade e segurança aos projetos de usinas e outras

instalações destinadas à geração de energia fotovoltaica. Akkas *et al.* (2017) buscaram selecionar o local ideal para instalação de uma usina de energia solar na região da Anatólia Central da Turquia. Já Garni e Awasthi (2017) abordaram condições semelhantes na Arábia Saudita e Fang, Li e Song (2018), na China.

De maneira semelhante, este trabalho também busca analisar as condições ambientais para geração de energia fotovoltaica, a partir de aspectos biofísicos, para a região Nordeste do Brasil. Para tanto, foram considerados três critérios específicos: as condições de cobertura do solo, a declividade média e a irradiação solar global horizontal.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho teve por objetivo geral identificar os impactos benéficos e adversos decorrentes da geração de energia em usinas fotovoltaicas e mensurar o potencial biofísico da região Nordeste. Foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Quantificar a ocorrência dos impactos previstos nas fases de planejamento, implantação, operação e desativação para os meios físico, biótico e socioeconômico de usinas fotovoltaicas no Nordeste do Brasil, entre os anos de 2012 a 2019;
- Organizar, temporalmente, as avaliações de impacto ambiental elaboradas para as usinas fotovoltaicas situadas no Nordeste brasileiro, para os anos de 2012 a 2019;
- Propor uma análise macroespacial, baseada em geoprocessamento, para determinar o potencial biofísico e a viabilidade ambiental para geração de energia fotovoltaica na região Nordeste.

CAPÍTULO 2
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 FONTES DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

Ao analisar a forma como a sociedade se desenvolveu, nota-se que o crescimento populacional juntamente com o desenvolvimento tecnológico contribuiu expressivamente para a ampliação nos níveis de consumo de energia. Contudo, observa-se que a diversidade da matriz energética a nível global ainda não se apresenta de forma satisfatória, tendo em vista o uso intensivo de combustíveis fósseis (BERMANN, 2008).

Conforme a Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2018), 81,1% da energia consumida mundialmente provém de combustíveis fósseis, sendo 31,9% derivada diretamente do petróleo. Tal percentual causa preocupação por motivos diversos: a dependência desenvolvida em prol do segmento petrolífero; a desigualdade quanto a disponibilidade desse recurso; os aspectos ambientais, configurados como agravos devido às ocorrências de vazamentos que poluem ambientes terrestres e aquáticos; além das emissões gasosas, responsáveis pela intensificação do efeito estufa.

Face às questões citadas, Santos (2016) relatou que a segurança energética é uma meta global alcançada por poucas nações. Ainda em consonância com a autora, faz-se necessário a implementação de investimentos em pesquisa e desenvolvimento de modo a propiciar o desenvolvimento e a viabilidade de novas tecnologias. Cita-se também a diversificação da matriz, de forma que permita adequar a produção de energia de acordo com as características locais.

Assim, discute-se as fontes de energias renováveis como uma possibilidade promissora. Pinto e Schemmer (2018, p. 8) as define como “[...] aquelas em que os recursos naturais utilizados são capazes de se regenerar, ou seja, são inesgotáveis”. Na percepção de Santos (2016) os principais benefícios a serem alcançados dizem respeito à segurança econômica e social, uma vez que grandes crises econômicas se associam ao preço e disponibilidade de petróleo. Já Pacheco (2006) relatou a possibilidade de esgotamento das fontes usuais não-renováveis e a redução dos danos ambientais.

No tocante às condições do Brasil frente à produção de energia limpa, Ferraz e Codeceira (2017) afirmaram que o país está muito à frente do que é vivenciado internacionalmente. Os combustíveis fósseis representam 55% e, ao tratar da matriz elétrica esse percentual reduz à 15%.

Quanto às principais fontes renováveis, Goldemberg e Lucon (2007) observaram possibilidades diversas, que podem propiciar a adaptação em conformidade com o uso

pretendido e a disponibilidade. Logo, as fontes mais usuais são: biomassa, potencial hidráulico, geotermal, eólica e solar, esta última a ser discutida com maior ênfase no próximo tópico.

2.2 A ENERGIA SOLAR

A energia solar possui como fonte a radiação solar, fato que permite caracterizá-la como renovável e de grande abundância. Salamanca-Ávila (2017) afirmaram que o Sol enquanto fonte energética é responsável direto por praticamente todas as demais fontes energéticas existentes, uma vez que permite a ocorrência do ciclo hidrológico, os fenômenos atmosféricos e o desenvolvimento de biomassa, alcançando nesse último caso os combustíveis fósseis.

Kemerich *et al.* (2016) mostraram que o homem, desde os seus primórdios, faz uso da energia solar. Inicialmente, tratava-se de processos simples, tais como a produção de fogo, e posteriormente, com o aperfeiçoamento das técnicas, foram desenvolvidos processos mais complexos.

Dentre as possibilidades de uso, Pinheiro Júnior *et al.* (2016) relataram a adoção em práticas de combate, no período de aproximadamente 200 anos antes de Cristo. Posteriormente, há relatos do aproveitamento da luz solar a partir da adoção de práticas arquitetônicas, de maneira que favoreciam o conforto térmico e a iluminação das edificações. Usos mais recentes dizem respeito ao emprego em atividades mais específicas, como a manufatura de metais, aquecimento de água e geração de energia, que alcançou o auge no século XX, com a descoberta do efeito fotovoltaico.

Quanto às vantagens associadas ao seu uso, Lana *et al.* (2015) afirmaram que é possível realizar aplicações muito distintas, desde o aproveitamento pela arquitetura solar; o aquecimento de água e materiais, caracterizando a otimização térmica; e a geração de energia elétrica, seja pelo meio mecânico ou fotovoltaico. Com isso, os autores relataram alguns benefícios para o segmento ambiental, como por exemplo, a redução de emissões de gases intensificadores do efeito estufa.

Em termos de usos energéticos, admite-se que tradicionalmente ocorre a geração e aproveitamento de calor, luz e energia elétrica, que associado à elevada disponibilidade tornam essa fonte uma das mais promissoras (BURSZTYN, 2020).

2.2.1 Radiação solar

Antes de discutir as principais técnicas de aproveitamento da energia solar, faz-se necessário entender como essa chega até o planeta e qual a magnitude do Sol enquanto fonte energética. De acordo com Pereira *et al.* (2017), o Sol fornece anualmente uma potência de aproximadamente $3,86 \cdot 10^{26}$ W de energia.

No tocante à radiação, é caracterizada pela propagação de ondas eletromagnéticas que chegam ao planeta graças ao movimento realizado em torno do Sol. Contudo, essa radiação não chega de forma direta uma vez que sofre interferências naturais, derivadas dos fenômenos atmosféricos e da angulação do globo terrestre em relação ao sol (PEREIRA *et al.*, 2017).

Ao tratar da declividade solar, Baldisera e Dallacort (2017) afirmaram que ela se origina a partir de órbita realizada pela Terra, que descreve um plano inclinado em relação ao plano equatorial. Essa inclinação varia entre $-23,5^\circ$ e $23,5^\circ$ (Figura 1). Ressalta-se ainda que a declinação é responsável pela mudança das estações ao longo do ano e finda por dificultar os cálculos para definir a posição do solar.

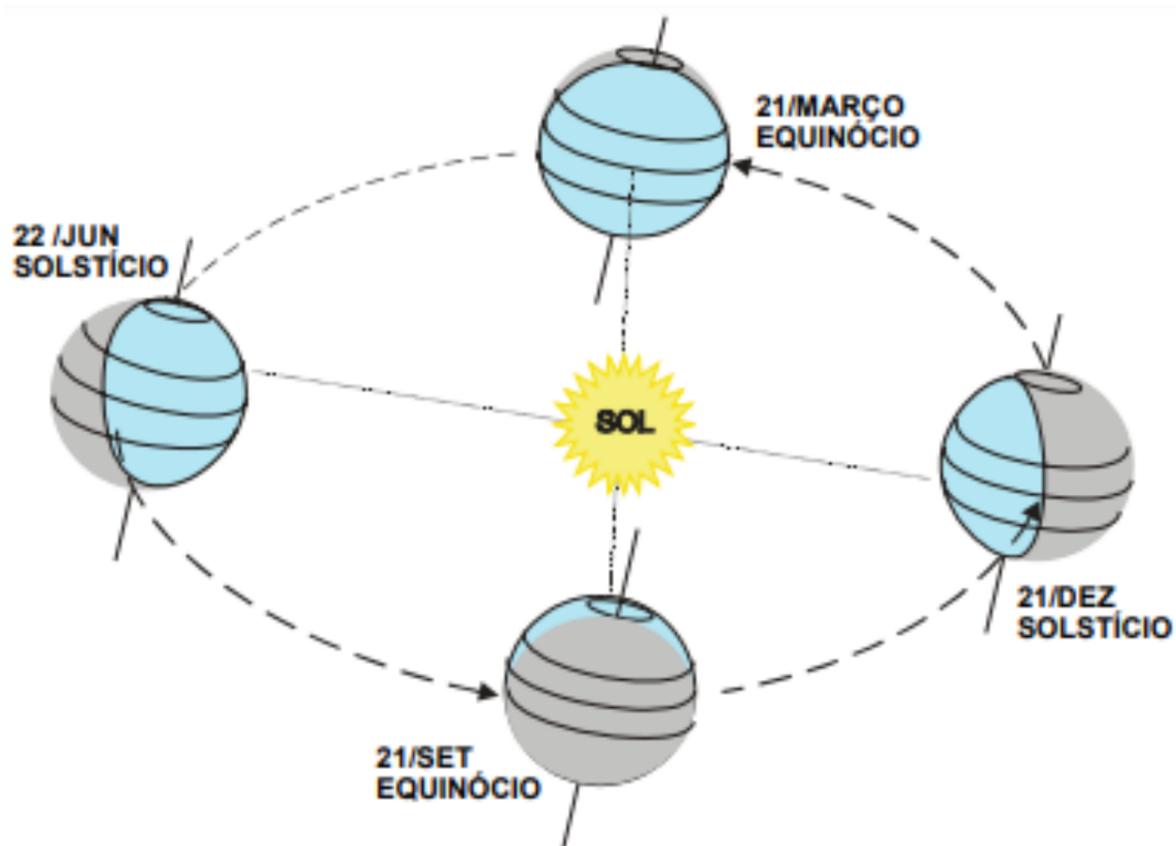


Figura 1: Ilustração da declinação solar.
Fonte: Varejão-Silva (2006).

Ainda na seara da radiação solar, outro conceito importante é o de “radiação solar ao nível do solo”. É importante compreender esse conceito uma vez que nem toda a

energia que entra no topo da atmosfera chega ao solo. Ao entrar em contato com a atmosfera, a radiação sofre espalhamentos e absorções devido às nuvens e camadas gasosas (PEREIRA *et al.*, 2017).

Conforme Pereira *et al.* (2017), de toda a energia que chega ao planeta aproximadamente 25% são absorvida pela atmosfera, propiciando o aquecimento do globo terrestre; 25% é refletida pelos gases; 5% é refletida pelo solo; e os 45% restantes são absorvidos pela litosfera. (Figura 2). Nesse contexto, admite-se também a emissão de radiação pela superfície na forma de infravermelho.

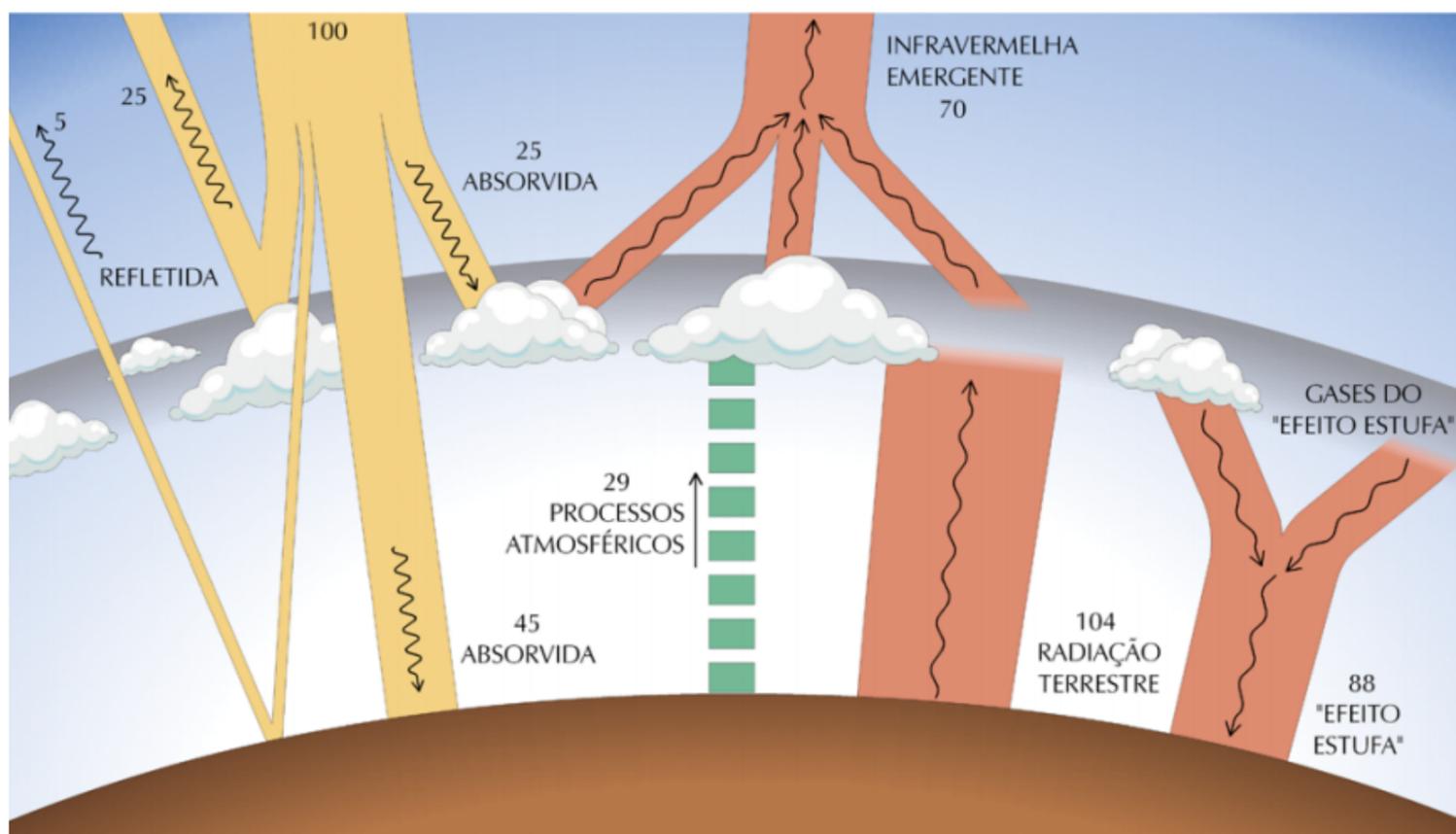


Figura 2: Interação da radiação solar com a atmosfera terrestre.

Fonte: Pereira *et al.* (2017).

Essas particularidades possuem grande relevância para a elaboração dos projetos para aproveitamento energético, apresentados na próxima subseção. Nesse sentido, afirma-se que propiciam maior segurança, viabilidade e precisão.

2.2.2 Aproveitamento da energia solar

O aproveitamento da energia solar conforme Kemerich *et al.* (2016), pode ocorrer a partir de dois processos: térmico e fotovoltaico. O uso da energia solar por vias térmicas varia de acordo com a temperatura desejada. Nesse sentido, admite-se que o aquecimento pode ser empregado em usos domésticos, comerciais e industriais, consideravelmente simples, como o aquecimento de água; bem como em processos mais robustos, a exemplo

da produção de energia elétrica, que se dá a partir da produção de vapor d'água que produz energia cinética convertida em energia potencial através de turbinas e por fim, transformada em corrente eletromagnética (KEMERICH *et al.*, 2016).

Dentre as inúmeras possibilidades quanto ao aproveitamento térmico, Mayer *et al.* (2007) relataram o uso de coletores solares que podem ser classificados em duas modalidades: baixo custo e alto desempenho. Em ambos os casos, a principal finalidade consiste no aquecimento da água, contudo, relata-se que os coletores de baixo custo possibilitam a adequação dessa tecnologia aos ambientes residenciais e, em casos mais específicos, o emprego em áreas isoladas.

Em relação ao aproveitamento fotovoltaico, Marinoski, Salamoni e Rütther (2004) pontuaram que se trata de um método ideal para a produção de energia elétrica por proporcionar menor poluição ao ambiente e permitir o uso de uma fonte inesgotável. As principais tecnologias aplicadas dizem respeito às células fotovoltaicas constituídas de silício (KEMERICH *et al.*, 2016).

O aspecto de maior relevância para o aproveitamento energético por essa via diz respeito às características da célula fotovoltaica. Nesse sentido, destaca-se o uso do silício como principal matéria prima por ser um semicondutor que permite a absorção dos fótons e geração de uma corrente elétrica no sistema (PINHO; GALDINO, 2014).

Ainda em relação às características das células fotovoltaicas, Torres *et al.* (2019) destacam o uso de tecnologias de primeira, segunda e terceira geração. No caso das unidades de primeira geração, destaca-se o uso do silício monocristalino, que possui um elevado custo de produção; o silício policristalino, que é economicamente mais acessível, mas apresenta rendimentos inferiores; e as células multijunções, que permite absorver a radiação em diferentes frequências.

As tecnologias de segunda geração se resumem aos filmes amorfos, caracterizados como uma película fina reduzindo a quantidade de material empregado. Já a terceira geração, diz respeito às células orgânicas produzidas a partir de polímeros e outros materiais não-metálicos, contudo, apresentam baixas taxas de conversão (TORRES *et al.*, 2019).

Quanto à produção, Cardoso *et al.* (2021) afirmam que no momento em que o raio solar incide sobre a célula fotovoltaica ocorre a geração de uma corrente elétrica que é conduzida pelo sistema até um inversor. Esse processo é potencializado mediante o agrupamento de painéis solares em série ou em paralelo e, em casos em que a produção

é superior ao consumo, é possível realizar o armazenamento em baterias, garantindo energia para demandas posteriores.

2.3 ENERGIA SOLAR NO BRASIL

A geração de energia elétrica fotovoltaica no Brasil se apresenta como um aspecto diretamente favorecido pelas condições ambientais. Dessa maneira, é válido enfatizar que se trata do país da América do Sul mais avançado nesse setor energético, sendo que as primeiras iniciativas datam da década de 1970, com a instalação da primeira fábrica de painéis solares. Com isso, os primeiros casos notáveis de geração energética a partir do Sol ocorreram em São Paulo nas décadas de 1980 e 1990 (VELOSO; TEIXEIRA; SILVA JÚNIOR, 2021).

Ao analisar a questão da energia solar no Brasil, Pinheiro *et al.* (2020) afirmaram que há um grande potencial, fato que decorre da expressiva dimensão territorial. Nessa perspectiva, Martins, Pereira e Echer (2004) mostraram que por estar localizado majoritariamente na região intertropical, o Brasil é favorecido pelas baixas variações nas taxas de irradiação solar e pela incidência de luz solar durante o ano todo.

Rosa e Gasparin (2016), ao analisar o potencial fotovoltaico brasileiro constataram que a capacidade total do país corresponde a 287.505 GWh/ano. O Nordeste apresenta elevadas taxas de irradiação (Figura 3), aspecto que favorece o aproveitamento energético.

Face a tais apontamentos, discute-se que o aproveitamento desse potencial pode vir a permitir o desenvolvimento social e tecnológico das áreas mais remotas, em especial a região Nordeste, que possui as maiores taxas de irradiação de todo o território nacional. Contudo, alcançar tal patamar ainda se mostra como um grande desafio, devido ao custo elevado para implantar essa tecnologia, tornando-a pouco competitiva em comparação ao que é fornecido pelas concessionárias (PINHEIRO *et al.*, 2020).

Diante dos aspectos citados, Bradshaw e Jannuzzi (2019) afirmaram que mesmo demandando um elevado investimento, a busca por serviços voltados à instalação de sistemas autônomos é crescente no Brasil. Dessa maneira, em 2016 haviam 14.312 microgeradores e as estimativas futuras mostram-se muito promissoras, chegando a 886.723 usuários em 2024.

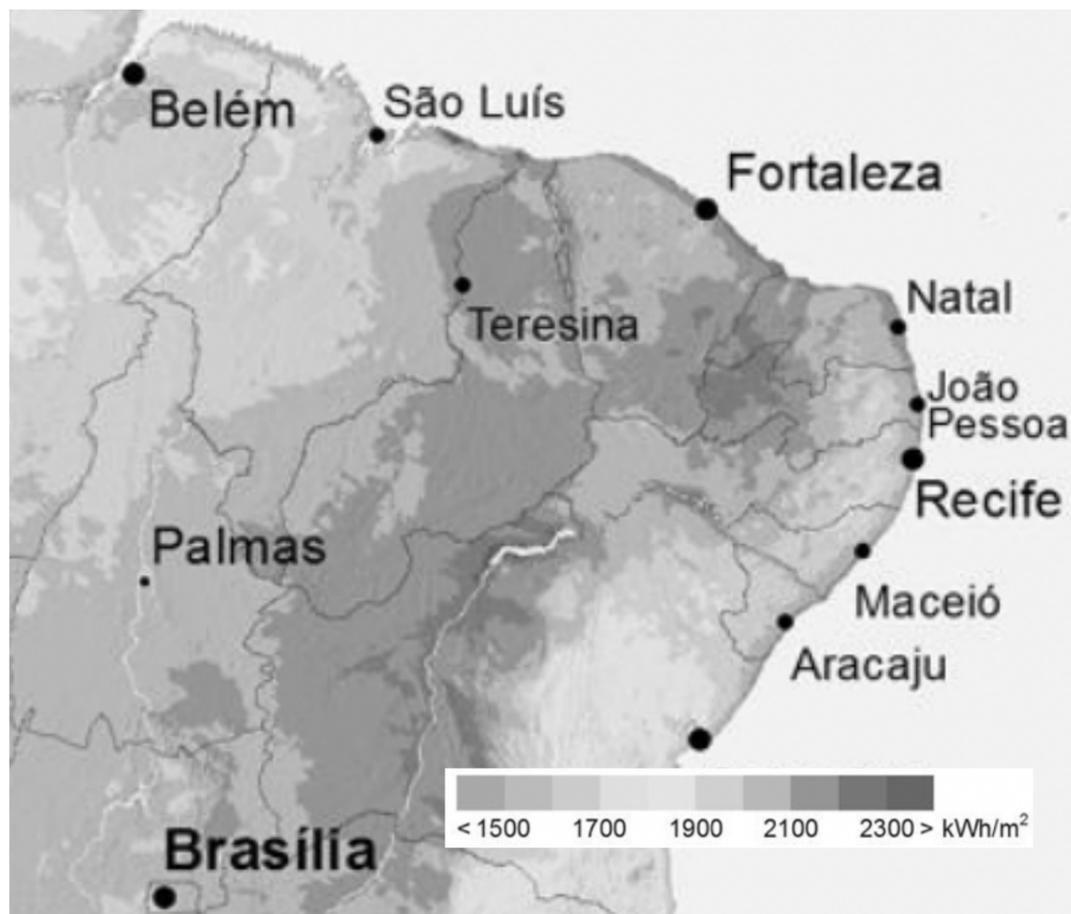


Figura 3: Irradiação solar típica no Nordeste do Brasil.
 Fonte: Rosa e Gasparin (2016).

Dentre os aspectos que permitem compreender as possibilidades de avanços desse setor, enfatiza-se os incentivos advindos dos programas e políticas públicas. Assim, cita-se: a venda direta aos consumidores, que permite que pequenos geradores comercializem a potência produzida; o Programa Luz para Todos, que prevê a instalação de painéis solares em áreas desprovidas de serviços de distribuição de energia; a redução do imposto de renda; a possibilidade de financiamento pela Caixa Econômica Federal e pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) (ROSA; GASPARIN, 2016).

2.4 AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS

A Avaliação de Impactos Ambientais (AIA) pode ser entendida como um conjunto de procedimentos, de caráter prévio e preventivo, que tem por finalidade identificar, prever, interpretar e comunicar informações sobre as consequências de um determinado empreendimento sobre a qualidade ambiental, produtividade e disponibilidade dos recursos naturais, e sobre a saúde e bem-estar humanos (SÁNCHEZ, 2008). Sendo assim, a AIA permite encontrar alternativas capazes de proteger o meio ambiente e a sociedade, bem como mitigar ou compensar efeitos relevantes que venham a recair sobre os compartimentos ambiental e social.

Na percepção de Braga *et al.* (2005), a AIA é um instrumento de planejamento ambiental. De acordo com os autores, foi implementado inicialmente nos Estados Unidos, mediante a criação da *National Environmental Policy Act (NEPA)*, ou Política Nacional do Meio Ambiente em 1969. Posteriormente, tornou-se um modelo amplamente adotado por países desenvolvidos e em desenvolvimento por todo o mundo.

Diante desses aspectos, na Avaliação de Impactos Ambientais é possível elencar algumas de suas funções, como eliminar projetos inviáveis e legitimar os viáveis; selecionar as melhores alternativas locacionais; fornecer o suporte à elaboração de planos e projetos; redefinir as responsabilidades e objetivos dos proponentes dos projetos e contribuir para o desenvolvimento sustentável a partir da gestão ambiental e negociação social (SÁNCHEZ, 2008).

No Brasil, nota-se que a implementação da AIA ocorreu mais de uma década após a sua instituição no território americano. As primeiras iniciativas em prol da construção de uma política ambiental datam de 1971, a partir do I Simpósio sobre Poluição Ambiental, contudo, não foram tomadas quaisquer atitudes significativas. Posteriormente, em 1972, foi publicada a obra "*The Limits of Growth*" (Os Limites do Crescimento), e, em seguida, realizou-se a Conferência das Nações Unidas, em Estocolmo, fazendo surgir a Secretaria Especial de Meio Ambiente (SEMA) em 1973 (ALMEIDA; GARRIDO; ALMEIDA, 2017).

Outros marcos de grande relevância sobre a construção da política ambiental brasileira também datam da década de 1970: a Conferência de Estocolmo foi promovida pela Unesco em 1975; a Conferência Intergovernamental sobre Educação Ambiental em 1977; e a criação do Comitê Especial de Estudos Integrados de Bacias Hidrográficas, no Brasil, em 1978 (FERREIRA; SALLES, 2016; POTT; ESTRELA, 2017).

Somente em 1981 instituiu-se a Política Nacional de Meio Ambiente a partir da Lei nº 6.938/1981. Esse dispositivo legal traz em seu escopo uma série de instrumentos, dentre eles, a Avaliação de Impactos Ambientais (BRASIL, 1981). Em seguida, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) publicou a Resolução nº 01/1986, na qual estão delineadas as definições, responsabilidades, critérios básicos e as diretrizes gerais para implementação da AIA (BRASIL, 1986).

Conforme a Resolução nº 01/1986 do CONAMA considera-se impacto ambiental

Qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam:

- I - a saúde, a segurança e o bem-estar da população;
- II - as atividades sociais e econômicas;
- III - a biota;
- IV - as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente;
- V - a qualidade dos recursos ambientais.

A resolução CONAMA também define as atividades passíveis de Estudos de Impactos Ambientais (EIA) e elaboração do respectivo Relatório de Impactos Ambientais (RIMA), dentre as quais são citadas a geração e transmissão de energia elétrica, conforme o porte do empreendimento. Outro aspecto pertinente são as diretrizes para a elaboração do EIA, no qual devem ser citadas todas as alternativas tecnológicas, identificação e avaliação de todos os impactos ambientais, delimitação da área de influência do projeto, e os planos e programas governamentais existentes na área de influência (BRASIL, 1986).

Quanto à elaboração, devem conter o diagnóstico prévio da área de interesse, de modo a identificar as condições iniciais; a análise dos impactos; definição das alternativas mitigadoras e compensatórias; e o programa de monitoramento e acompanhamento. Dada a complexidade dos estudos, estes devem ser realizados por uma equipe multidisciplinar e, no caso do RIMA, deve apresentar-se de maneira clara, objetiva e acessível (BRASIL, 1986).

Posteriormente, com a promulgação da Constituição Federal de 1988, nota-se um fortalecimento do arcabouço jurídico-ambiental brasileiro, uma vez que o art. 225 prevê que “todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida” É estabelecido ainda que cabe ao poder público e à coletividade a responsabilidade de defender e preservar o meio ambiente com vistas às gerações presentes e futuras. Nesse contexto, considerando as prerrogativas que subsidiam a AIA, este instrumento torna-se indispensável para a promoção desse direito.

Para a execução da AIA uma série de ferramentas podem ser empregadas. Braga *et al.* (2005) e Sánchez (2008) fizeram referência aos *checklists* (listas de verificação), às matrizes, diagramas de interação, o método *ad hoc*, a sobreposição de cartas; os modelos de simulação, análise de custo-benefício e a análise multiobjetivo (Tabela 1).

Tabela 1: Descrição das ferramentas de AIA.

Ferramenta	Descrição
<i>Checklist</i>	Listas padronizadas com fatores ambientais associados ao estudo. Inclui a descrição dos impactos, a escala de valores e os índices de ponderações; Podem ser organizadas para cada fase do projeto.
Matrizes	Relaciona os impactos através de matrizes, onde linhas são as ações e as colunas os fatores ambientais; Fácil visualização e comunicação dos impactos e suas causas; Dificuldade para visualizar impactos de ordens subsequentes e a espacialidade dos impactos; Exemplos: matriz de Leopold e matriz de Passos.
Diagramas de interação	Focado na descrição dos impactos e seus desdobramentos identificados por meio das conexões em um diagrama de rede; Aos possíveis impactos identificados na rede podem ser associados parâmetros de magnitude, importância e probabilidade.
Método <i>ad hoc</i>	Baseia-se no conhecimento e experiência de um grupo de especialistas (conhecedores); Usa <i>brainstorming</i> – não segue padrão definido, apesar de existir métodos e formas para organizar e conduzir o processo <i>de brainstorming</i> ; É susceptível a tendenciosidades – exige cuidado na escolha da equipe.
Sobreposição de cartas	Consiste na sobreposição de cartas temáticas (SIG), sendo um para cada fator ambiental; Sobreposição permite o cruzamento de informações relacionadas com a susceptibilidade e fragilidades da área de influência, identificando quais são as áreas mais críticas e onde os impactos poderão se desenvolver em função da área de influência das ações.
Simulação	São relações matemáticas representantes da interação entre as variáveis de componentes interconectados (estrutura e funcionamento) do sistema, e que, a partir de hipóteses e cenários de ações, provêm informações quantitativas que servem para avaliar seu desempenho e impactos.
Análise de custo-benefício	Propõe computar os custos e os benefícios de um projeto; A avaliação do projeto limita-se à uma unidade de medida monetária o que lhe torna limitado.
Análise multiobjetivo	Parte da definição dos objetivos a serem considerados em uma determinada situação decisória; Os objetivos devem pautar a maximização econômica e do bem-estar social e a minimização dos impactos ambientais; É comumente estruturado de forma hierárquica.

Fonte: Braga *et al.* (2005) e Sánchez (2008).

2.5 IMPACTOS AMBIENTAIS DECORRENTES DAS USINAS FOTOVOLTAICAS

Os sistemas fotovoltaicos são considerados como uma das fontes de energia elétrica menos poluentes, quando comparados às fontes convencionais de energia, fato que permite benefícios significativos ao meio ambiente. Contudo, também apresentam implicações negativas, sejam estas diretas ou indiretas, quanto ao uso do solo, modificação da paisagem, alterações dos ecossistemas, mudanças climáticas, além da saúde e segurança humana (VRÎNCEANU *et al.*, 2019).

Diante de tal realidade, Guerin (2017) organizou os impactos socioambientais advindos dos sistemas fotovoltaicos em onze categorias: impactos de transporte e logística, fauna, flora, impactos visuais, ocorrência de incêndios florestais, modificação nas condições de solo, uso de recursos e geração de resíduos, modificação da qualidade do ar e da água, produção de ruído, gestão de mercadorias perigosas e reclamações e incidentes junto à comunidade. Contudo, nota-se que a maioria apresenta um nível de impacto baixo.

Ao analisar os impactos decorrentes do transporte e da logística, considera-se, principalmente, as modificações ocasionadas no tráfego de veículos na fase de implantação da usina. Nesse sentido, constata-se que a construção da planta fotovoltaica não tem impactos significativos sobre o fluxo nas rodovias, contudo, tende a ocorrer um aumento, quanto à presença de veículos leves. Outra questão pertinente é a transmissão da energia de usinas de grande porte, que demandam grandes estruturas que podem cruzar as vias e comprometer o tráfego. Entretanto, estes são aspectos que variam de acordo com a infraestrutura disponível em cada região, logo, os impactos incidentes podem apresentar variações quanto à gravidade, escala espacial e temporal (GUERIN, 2017).

O impacto das instalações fotovoltaicas no uso e cobertura do solo depende de vários fatores, como topografia, a área de superfície coberta e o tipo de uso da terra (VRÎNCEANU *et al.*, 2019). Observa-se que esses sistemas de geração de energia tendem a ocupar áreas consideráveis, podendo surgir a competitividade com outras atividades econômicas, como a agricultura e a pecuária. Todavia, essa é uma questão que possui soluções bem definidas, dentre as quais cita-se o uso de áreas inférteis e de pouco valor agregado e o emprego de painéis mais eficientes (TAWALBEH *et al.*, 2021).

Ainda em conformidade com Tawalbeh *et al.* (2021), os impactos sobre o solo perpassam por outros aspectos, uma vez que a fase de construção é a que gera maiores

danos, devido à ocorrência de compactação pelo uso de máquinas pesadas, a impermeabilização decorrente da aplicação de concretos, instalação das estruturas e a implantação das valas para cabos. Assim, alternativas diversas podem mitigar ou reduzir esses problemas, como a redução das distâncias entre as fileiras de painéis; aproveitamento de telhados; a instalação em corpos d'água a partir de estruturas flutuantes; e a instalação em áreas já degradadas, como os aterros sanitários desativados.

No que concerne às questões ecológicas, é notório que as usinas fotovoltaicas propiciam impactos negativos à biodiversidade, devido à supressão vegetal, perdas de habitat e modificações físicas, sobretudo no microclima local (MOORE-O'LEARY *et al.*, 2017; GUILLER *et al.*, 2017). É pertinente citar também as modificações significativas na paisagem, que também contribuem para intensificar os danos ecossistêmicos (RABAIA *et al.*, 2021).

A ocorrência de implantação em ecossistemas naturais implica, quase que obrigatoriamente, em danos à micro e macrofauna e à flora, que se tornam ainda mais críticos quando se tratam de espécies vulneráveis. No entanto, tais impactos podem ser minimizados mediante remanejamento dos indivíduos para outras áreas e a criação de corredores ecológicos (GUERIN, 2017).

Ao tratar das alterações climáticas, estas tendem a ocorrer na escala local e derivam da remoção da vegetação, promovendo alterações significativas quanto a evapotranspiração. Esse aspecto, por sua vez, modifica o balanço de energia no sistema solo-planta-atmosfera por aumentar a exposição do ambiente à radiação, o que contribui para o aumento da temperatura na superfície ao nível do solo e na atmosfera imediata (RABAIA *et al.*, 2021).

As usinas fotovoltaicas também podem impactar na qualidade da água e no ciclo hidrológico, por contribuir para o aumento da erosão do solo, elevando a turbidez e a carga de sedimentos nos riachos locais; promover a redução da infiltração da água da chuva, reduzindo a recarga de água subterrânea e a susceptibilidade a inundações (RABAIA *et al.*, 2021). Ocorre ainda o aumento do consumo de água devido a necessidade de limpeza periódica dos painéis para não prejudicar a eficiência quanto a geração de energia (DHAR *et al.*, 2020).

Em relação a saúde humana, observa-se que os impactos estão relacionados a qualidade do ar. Devido a dispersão de partículas de poeira ou compostos tóxicos que impactam de forma negativa na saúde dos funcionários. Essa dispersão de partículas ocorre em diferentes estágios da instalação, operação e manutenção das usinas. Além

disso, pode ocorrer riscos de contaminação dos corpos hídricos, fator resultante do aumento do carreamento de sedimentos (VRÎNCEANU *et al.*, 2019).

Para além dos impactos negativos, há uma série de impactos positivos relacionados à implantação dos sistemas fotovoltaicos. O setor de energia fotovoltaica pode contribuir para aumentos na geração de empregos, favorecendo a renda familiar, a receita tributária e o Produto Interno Bruto (PIB). Em um contexto mais amplo, admite-se que permite a redução de emissões de gases de efeito estufa, maior segurança energética e fornecimento de energia eficiente (WANG; FAN, 2021).

2.6 AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA

O uso da energia fotovoltaica está se expandindo em todo o mundo, neste sentido, a capacidade global de potência instalada corresponde a 871 GW em 2021 (IEA, 2020; IRENA, 2020). Com isso, é notório o interesse nesse assunto em muitos países. No entanto, a ausência de planejamento dos projetos pode resultar em dificuldades ao longo do processo de implementação que, por sua vez, reverbera sobre os aspectos econômicos, sociais e ambientais (REDISKE *et al.*, 2019).

Com vistas aos pontos supracitados, percebe-se que a escolha das áreas destinadas à instalação de empreendimentos fotovoltaicos constitui um elemento-chave para determinar a viabilidade do empreendimento. Dessa maneira, para que possa ocorrer a identificação de áreas adequadas faz-se necessária a realização de análises espaciais, com a finalidade de mitigar ou reduzir os impactos indesejáveis, incidentes sobre a biodiversidade, a paisagem e os usos da terra (YOUSEFI; HAFEZNIA; SAHZABI, 2018).

Ao encontro desta questão, Shorabeh *et al.* (2019) afirmaram que os fatores ambientais, econômicos e sociais devem ser considerados para determinar locais apropriados, possibilitando a maximização da geração e a redução de custos com a instalação dos sistemas e transferência da energia gerada. Todavia, a tomada de decisão acerca das localidades destinadas a esta finalidade configura uma etapa de grande dificuldade, uma vez que os locais devem ser climaticamente e geograficamente satisfatórios e apresentarem elevados potenciais de geração (FANG; LI; SONG, 2018).

Tabela 2: Descrição dos métodos e critérios utilizados para determinação de áreas adequadas para a instalação de usinas fotovoltaicas.

Fonte	Métodos	Crítérios
Liu, Xu e Lin (2017)	SIG + <i>Analytic Hierarchy Process (AHP)</i>	Elevação, temperatura, radiação solar, lucros econômicos, investimento inicial, rendimento total, custos de manutenção e interrupção, economia de emissão de carbono.
Merrouni <i>et al.</i> (2018)	SIG + AHP	Irradiação horizontal global, declividade, distância das áreas residenciais, distâncias das vias de tráfego, distância das redes de transmissão de energia, distância dos corpos hídricos.
Zambrano-Asanza, Quiros-Tortos, Franco (2021)	SIG + AHP	Uso e cobertura do solo, distância das linhas de transmissão, distância das vias principais, distância das áreas urbanas, irradiação solar, temperatura média e declividade.
Al-Shammari <i>et al.</i> (2021)	SIG + AHP	Irradiação solar, temperatura média, tempestade de poeira, declividade, distância das linhas de transmissão, densidade populacional e redução das emissões de carbono.
Colak, Memisoglu, Gercek (2020)	SIG + AHP	Potencial de energia solar, declividade, instalações de transmissão de energia, vias, corpos hídricos superficiais, cobertura do solo, áreas urbanas, linhas de gás natural.
Guaita-Pradas <i>et al.</i> (2019)	SIG	Temperatura, altitude, radiação, fertilidade do solo, profundidade, geologia, declividade, cobertura do solo e erosão.
Choi, Suh e Kim (2019)	SIG + AHP	Declividade, distância das estradas, cobertura do solo, eficiência dos painéis, radiação solar, chuva, distância das áreas urbanas, pó e disponibilidade de luz solar.
Fang, Li e Song (2018)	SIG + <i>Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)</i>	Duração da luz solar, declividade, influência ambiental, custo, apoio à política, usos da terra, suporte público, impacto na economia local.
Li, Xu, Li (2020)	SIG + <i>Fuzzy grey relational projection (FGRP)</i>	Irradiância horizontal global anual, temperatura média anual, qualidade atmosférica, condições geológicas, custos de arrendamento de terras, impacto na economia local, apoio público, subsídios governamentais, redução de impostos.

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Dessa maneira, nos últimos anos é possível notar uma ascensão nas pesquisas orientadas à seleção de locais adequados para instalação de usinas solares (Tabela 2). Estas, por sua vez, se concentram principalmente na seleção baseada em sistemas de

informações geográficas (SIGs) e no emprego dos métodos de decisão multicritério (MDMC) (LI; XU; LI, 2020). A partir disto, é pertinente identificar e discutir os principais critérios e metodologias aplicadas no processo de escolha das áreas para locação das usinas fotovoltaicas (Tabelas 3).

Tabela 3: Classificação dos critérios.

Critério	Subcritério
Climático	Irradiação solar, chuvas, temperatura, umidade, velocidade do vento, tempestades de areia, duração da hora solar.
Orográfico	Declividade, geologia, topografia, altitude.
Localização	Distância das áreas urbanas, das vias de tráfego, dos corpos hídricos, das redes de transmissão de energia.
Econômico	Lucros econômicos, investimento inicial, rendimento total, custos de manutenção e interrupção, impacto na economia local, custos de arrendamento de terras, subsídios governamentais, redução de impostos.
Ambiental	Fertilidade do solo, cobertura do solo, erosão.
Social	Apoio à política, apoio público.

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

A partir das informações apresentadas se observa que muitos critérios podem ser empregados para determinar a viabilidade social, ambiental e econômica de áreas para a instalação de usinas fotovoltaicas. É válido enfatizar que a intenção da Tabela 2 não consiste em esgotar as possibilidades de elementos a serem adotados para esta tomada de decisão, uma vez que, ao consultar os trabalhos citados percebe-se que muitos critérios variam de acordo com as condições ambientais, sociais, econômicas e políticas das localidades estudadas.

Outro fator a ser discutido é a combinação do SIG com os MDMC, em especial o método AHP frequentemente empregado nas pesquisas listadas. Esta metodologia, dentre outros ganhos, possibilita espacializar os critérios e restrições, determinar os pesos atribuídos a cada critério, avaliar as alternativas e selecionar as áreas aptas para implantação dos sistemas fotovoltaicos (AL-SHAMMARI *et al.*, 2021).

Dentre os critérios adotados, destaque à radiação solar, por se tratar de um fator climatológico que interfere diretamente no desempenho das usinas fotovoltaicas, de modo que quanto maior a disponibilidade de radiação, melhor a produtividade de eletricidade (FANG; LI; SONG, 2018). No que cerne à irradiação, verifica-se que muitos trabalhos

consideram a irradiação global horizontal, que pode ser entendida como sendo a soma da irradiação direta com a irradiação difusa (LI; XU; LI, 2020; MERROUNI *et al.*, 2018).

Já em relação às condições de cobertura e uso do solo, deve-se considerar a necessidade de preservar os ecossistemas, de modo a evitar perturbações à vida selvagem e à biodiversidade florística. Logo, os índices de vegetação são elementos utilizados de forma recorrente, de modo que quanto mais elevado o vigor vegetal, menor a compatibilidade da área com as usinas (SHORABEH *et al.*, 2019; ZAMBRANO-ASANZA; QUIROS-TORTOS; FRANCO, 2021).

Acerca da declividade, também empregada neste trabalho, quando o terreno não atende a condições topográficas adequadas, faz-se necessário o emprego de operações de terraplanagem, corte e aterro que demandam maiores custos e tempo de execução (ZAMBRANO-ASANZA; QUIROS-TORTOS; FRANCO, 2021). Percebe-se que não há um consenso definido quanto ao percentual de declive, logo nota-se na literatura o emprego de valores distintos: 2%, 3%, 5%, 20% (MERROUNI *et al.*, 2018; COLAK; MEMISOGLU; GERCEK, 2020).

Dentre os critérios menos usuais, cita-se o pó e as tempestades de poeira, citados por Choi, Suh e Kim (2019) e Al-Shammari *et al.* (2021), respectivamente. O fator que explica o emprego desses aspectos é justamente as condições locais, visto que a Península Arábica se caracteriza como uma região altamente suscetível a estes fenômenos ambientais.

CAPÍTULO 3
MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

Neste trabalho, a região Nordeste do Brasil (Figura 4) foi adotada como área de estudo, por se tratar de uma porção territorial com ampla aptidão para o segmento fotovoltaico, devido à elevada irradiação incidente (ROSA; GASPARIM, 2016). Ao encontro desta questão, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2017) revela que a radiação horizontal global na localidade varia entre 4.583 Wh/m²dia e 6.120 Wh/m²dia.

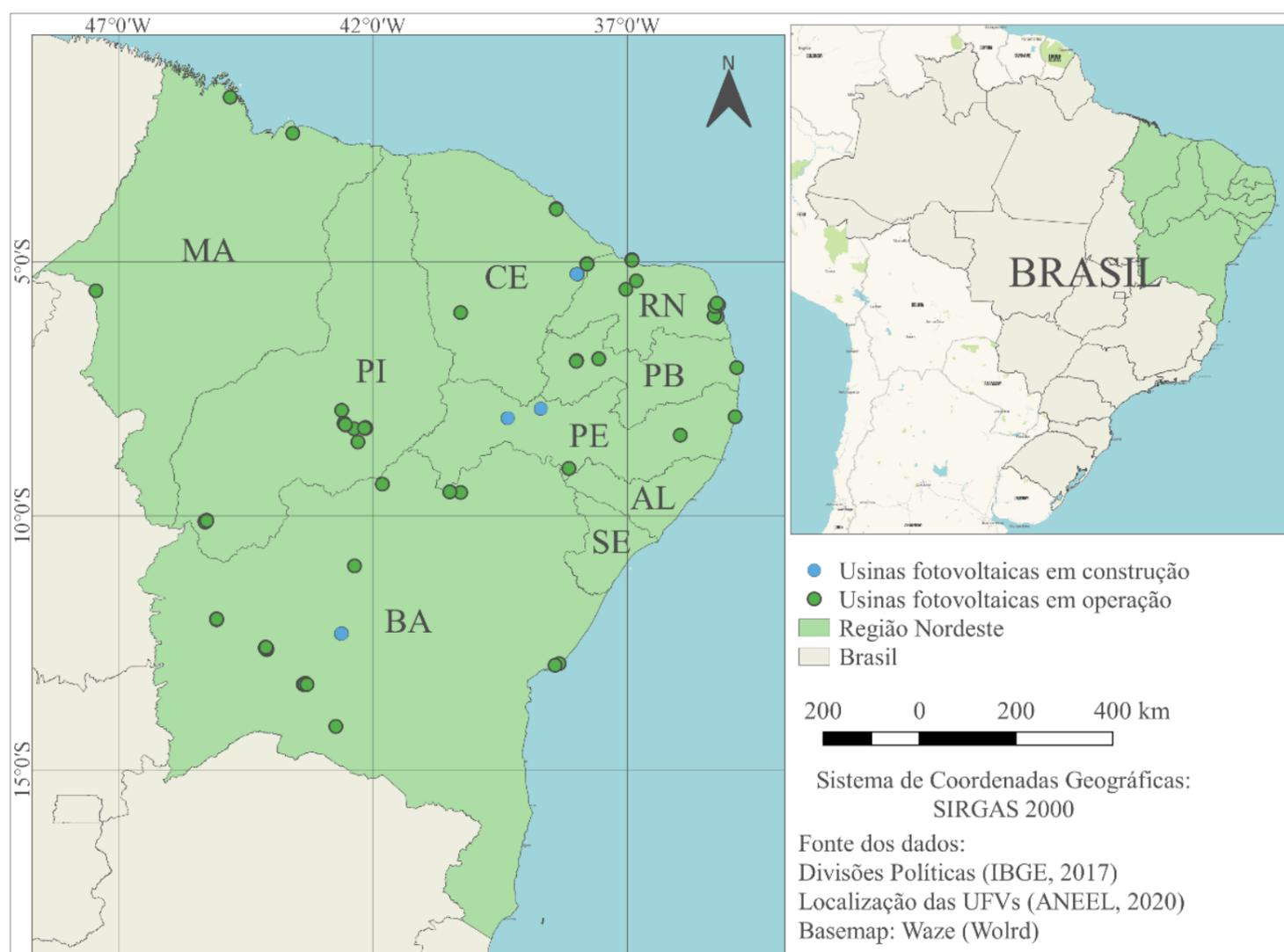


Figura 4: Mapa de localização das usinas fotovoltaicas em operação e em construção no Nordeste do Brasil no ano de 2020.

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

De acordo com a ANEEL (2020), a região Nordeste possuía, no ano de 2020, 461 empreendimentos destinados à geração de energia solar, totalizando uma potência outorgada total de 16,029 milhões de kW. Destas, 97 empreendimentos estão em operação, 43 na fase de construção e 321 constam como construção não iniciada. Ganham destaque os estados da Bahia, onde a potência outorgada corresponde a 4,4 GW; o Piauí, com 3,4 GW; e o estado do Pernambuco, com 2,9 GW outorgados.

Ao analisar as características físicas dessa região, percebe-se que apresenta um relevo plano na maior parte do território, tendo em vista a extensa área ocupada pelos planaltos e chapadas da Bacia do Parnaíba. Também ocorre a Depressão Sertaneja, situada entre brejos de altitudes, onde a declividade é mais acentuada. Já em relação ao clima, predominam quatro tipologias distintas, considerando a classificação de Strahler: Equatorial úmido, Tropical, Tropical Semiárido e Litoral Úmido. Dessa maneira, ocorre uma grande variação de temperatura média, entre 20 °C e 28 °C e precipitação entre 300 mm e 2.000 mm (ROCHA *et al.*, 2010).

Ainda de acordo com Rocha *et al.* (2010), outros fatores que permitem caracterizar o Nordeste brasileiro é a vegetação, visto que ocorre a presença de diversos biomas: a Caatinga, que se apresenta como bioma predominante; o cerrado; a Mata Atlântica e a Mata dos Cocais.

Destaca-se ainda os aspectos demográficos macrorregionais, uma vez que o Nordeste, conforme as estimativas do IBGE (2020), possui uma população superior a 57,3 milhões de habitantes, equivalente a aproximadamente 27% da população brasileira. Assim, destaca-se que é a segunda região mais populosa do país ficando atrás somente da região Sudeste.

3.2 ANÁLISE DOS ESTUDOS DE IMPACTOS AMBIENTAIS

O processo de previsão de impactos adotado neste estudo compreende duas etapas. Primeiramente, foi realizada a triagem dos impactos ambientais em busca de identificar a melhor forma de descrever o efeito e, portanto, definir como prevê-lo. Em seguida, a segunda etapa, definida como estudos de base, que consiste na coleta de dados das atividades necessárias para o desenvolvimento da geração de eletricidade fotovoltaica.

A coleta de dados teve início na identificação e localização das usinas fotovoltaicas (UFV) cadastradas no Sistema de Informação Geográficas do Setor Elétrico (SIGEL) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). As informações foram coletadas a partir de um modelo conceitual proposto pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA, 2016), que consiste na estruturação dos dados, considerando a tipologia da atividade, o empreendimento, as fases, os componentes, os meios e os impactos ambientais. A quantificação histórica dos impactos ambientais da atividade de geração de eletricidade fotovoltaica foi realizada utilizando a metodologia da lista de verificação (Tabela 4).

Tabela 4: Lista de verificação utilizada para coleta e parametrização dos dados ambientais.

GRUPO (meios)	SUBGRUPO (componentes)	NATUREZA	CATEGORIA
Meio biótico	Fauna (FA)	Negativo	1
		Positivo	2
	Flora (FL)	Negativo	3
		Positivo	4
Meio físico	Solo (SO)	Negativo	5
		Positivo	6
	Geo/Geom (GEO)	Negativo	7
		Positivo	8
	Clima/Ar (CQA)	Negativo	9
		Positivo	10
	Recursos hídricos (RH)	Negativo	11
		Positivo	12
	Paisagem (PA)	Negativo	13
		Positivo	14
Meio socioeconômico	Arrecadação tributária (AT)	Negativo	15
		Positivo	16
	Economia local e regional (ELR)	Negativo	17
		Positivo	18
	Empregos (EM)	Negativo	19
		Positivo	20
	Saúde e segurança da população (SSP)	Negativo	21
		Positivo	22
	Ordenamento territorial e energia (OTE)	Negativo	23
		Positivo	24
	Aspectos sociais e infraestrutura local (ASIL)	Negativo	25
		Positivo	26
Saúde e segurança no trabalho (SST)	Negativo	27	
	Positivo	28	
Impactos genéricos sem classificação (IGSC)	Negativo	29	
	Positivo	30	

Fonte: IBAMA (2016).

As listas de verificação se configuraram como um dos mais antigos métodos de AIA. Essas listas podem ser apresentadas de diferentes formas, as quais vão desde uma lista simples com os potenciais impactos a serem considerados até abordagens mais detalhadas contendo classificações, descrição, escalas e técnicas de previsão de impactos, podendo ser organizadas para cada fase do projeto (BRAGA *et al.*, 2005; SÁNCHEZ, 2008).

Nesse trabalho optou-se por utilizar a listagem de verificação simples, apenas distinguindo a natureza positiva ou negativa do impacto ambiental. A partir da listagem de verificação simples, foram catalogados 41 estudos ambientais, desenvolvidos entre 2012 e 2019, de usinas fotovoltaicas de geração centralizada, situadas no Nordeste brasileiro.

Após relacionar todos os impactos ambientais no modelo apresentado na Tabela 4, estes foram categorizados em 3 grupos (meios) de ocorrência conforme indicou cada

estudo ambiental. Por fim, os grupos foram divididos em positivos ou negativos nos 15 subgrupos (componentes). Conseqüentemente, foi quantificada a ocorrência de cada impacto ambiental por ano e, finalmente, indicada a frequência relativa em que cada grupo (meios) e subgrupos (componentes) foram afetados no período avaliado. Também foi quantificada a ocorrência dos impactos nas fases de planejamento, implantação, operação e desativação.

3.3 POTENCIAL BIOFÍSICO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA

Na elaboração do potencial biofísico para geração de energia fotovoltaica (PBioFV) foram elencados e integrados os seguintes componentes: a Irradiação Global Horizontal (IGH), a declividade do terreno (D), as classes de cobertura do solo (NDVI) e os elementos restritivos (ER) para a implantação do segmento (Equação 1). Para tanto, empregou-se o *Software Quantum GIS* (QGIS) versão 3.10

$$\text{PBioFV} = (0,2 \cdot D + 0,5 \cdot \text{IGH} + 0,3 \cdot \text{NDVI}) - \text{ER} \quad (1)$$

Os pesos atribuídos aos componentes foram definidos a partir de uma consulta a literatura onde foram considerados trabalhos semelhantes para outras localidades no Brasil e em outros países (AZEVEDO; CANDEIAS; TIBA, 2017; GARNI; AWASTHI, 2017; IZEIROSKI *et al.*, 2018). Neste sentido, considerou-se que a declividade possui uma relevância de 20%, a radiação 50%, e as classes de cobertura do solo 30%. Na sequência serão detalhados os procedimentos empregados para o manuseio e refinamento dos dados em prol da geração do produto final.

3.3.1 Declividade

Para a obtenção da declividade média do relevo foram utilizados os Modelos Digitais de Elevação (MDEs) disponibilizados pela *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). Os modelos digitais produzidos por essa missão estão organizados em intervalos de 1° por 1°, sendo oferecidas resoluções de 30 metros para os Estados Unidos e de 90 metros para as demais localidades (UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY –

USGS, 2018). Quanto à categorização dos valores (Tabela 5) foi adotada a classificação da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2018).

Tabela 5: Intervalos e classes de declividade média do relevo.

INTERVALOS	CLASSES ATRIBUÍDAS.
0% a 3%	Plano
3% a 8%	Suave ondulado
8% a 20%	Ondulado
20% a 45%	Forte ondulado
45% a 75%	Montanhoso
> 75%	Escarpado

Fonte: Embrapa (2018).

Dentre os parâmetros empregados para determinar o potencial associado à declividade foram consideradas áreas com pequenas inclinações que possuem maior viabilidade, conforme recomenda Izeiroski *et al.* (2018). Nesse sentido, o mapa de declividade foi normalizado da seguinte maneira: para declividades menores ou iguais a 5% foi atribuído o valor 1, nos demais casos, onde a declividade de mostrava superior a 5% foi atribuído o valor 0.

É pertinente salientar que, como a declividade média configura apenas uma das três variáveis empregadas no Índice Biofísico, mesmo as áreas para as quais foi atribuído o valor zero, ainda possuem viabilidade, tendo em vista o somatório das demais variáveis e o peso atribuído (20%) em relação ao índice total. Contudo, as porções com declividade superior a 45° foram consideradas impróprias por configurarem áreas de preservação permanente, conforme a Lei nº 12.651/2012, que institui o Código Florestal brasileiro.

3.3.2 Irradiação Global Horizontal

A irradiação solar está diretamente relacionada à quantidade de energia disponível para ser absorvida pelos painéis fotovoltaicos. Desse modo, foram utilizados dados disponibilizados pelo Atlas Brasileiro de Energia Solar desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2017). Esta base de dados é constituída por 72.272 registros das médias mensais e anuais do total diário de irradiação, em Wh/m²dia, disponibilizados em uma resolução espacial de 10 km.

Para tratar os dados de irradiação e torná-los disponíveis em uma escala apropriada foi utilizada a calculadora de raster do QGIS. Assim, foram obtidos valores

padronizados (R_p), mediante a divisão dos valores originais (r) pelo maior valor observado (r_{max}) no conjunto de dados (Equação 2).

$$R_p = r/r_{max} \quad (2)$$

3.3.3 Classes de cobertura do solo

Para definir as classes de cobertura do solo, foi empregado o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI). O NDVI consiste na razão entre a diferença de refletividade das bandas do infravermelho próximo (NIR) e do vermelho (RED) pela soma das mesmas (Equação 3).

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \quad (3)$$

O comprimento de onda do infravermelho próximo varia entre 800 nm e 1100 nm enquanto a faixa de reflectância do vermelho pode oscilar entre 600 nm e 700 nm. Os valores de NDVI, por sua vez, ficam distribuídos em um intervalo entre -1 e 1 (BANDEIRA; CRUZ, 2021). Neste estudo, foram utilizadas as medianas das sequências de imagens NDVI (produto MOD13Q1 – USGS, 2018), de janeiro a dezembro de 2020, com resolução espacial e temporal de 250 metros e 16 dias, respectivamente, totalizando 23 imagens. Optou-se por adotar a mediana pelo fato de a média ser uma medida de dispersão fortemente influenciada pelos valores extremos tornando-se recorrentemente pouco representativa.

Esse produto foi gerado a partir do Sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), a bordo do satélite TERRA (EOS-AM-1), disponibilizado gratuitamente pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). Devido à dimensão da área de estudo optou-se por realizar o processamento dos dados pela plataforma de processamento em nuvem do *Google Earth Engine*.

Para a classificação do NDVI (Tabela 6) foram consideradas as mesmas classes de cobertura do solo indicadas por Bandeira e Cruz (2021).

Tabela 6: Classes atribuídas ao *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI).

INTERVALOS DO NDVI	CLASSES
-0,157 a 0,089	Corpos hídricos
0,089 a 0,527	Solo exposto/Área urbana
0,527 a 0,627	Atividade fotossintética baixa
0,627 a 0,715	Atividade fotossintética moderadamente baixa
0,715 a 0,785	Atividade fotossintética média
0,785 a 0,838	Atividade fotossintética moderadamente alta
0,838 a 1,000	Atividade fotossintética alta

Fonte: Bandeira e Cruz (2021).

Para a padronização dos dados de cobertura do solo, considerou-se que quanto maior o valor do NDVI menor seria a viabilidade da área para produção de energia fotovoltaica, visto que a supressão vegetal configura um dos aspectos ambientalmente indesejáveis, devendo ser mitigado ou compensado. Ademais, também se considerou que as áreas classificadas como corpos hídricos seriam impróprias para tal atividade as quais foi atribuído o valor 0 (Tabela 7).

Tabela 7: Padronização do *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI).

INTERVALOS DO NDVI	VALORES
-0,157 a 0,089	0,00
0,089 a 0,627	1,00
0,627 a 0,785	0,75
0,785 a 0,838	0,50
0,838 a 1,000	0,25

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

3.3.4 Elementos restritivos

Este componente elimina as áreas consideradas restritas para a atividade fotovoltaica. Foram consideradas áreas como restrições (Equação 4) as Unidades de Conservação Federais (UC) e as porções territoriais que apresentam declividade superior a 45° (D⁴⁵⁺), que, por sua vez, caracterizam área de preservação permanente (APP). Com isso, buscou-se atender as diretrizes legais previstas pela Lei nº 9.985/2000, que institui Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC), e Lei nº 12.651/2012, que trata do Código Florestal.

$$ER = UC + D^{45+} \quad (4)$$

O SNUC emprega o seguinte entendimento para UC:

Art. 2º Para os fins previstos nesta Lei, entende-se por:

I - unidade de conservação: espaço territorial e seus recursos ambientais, incluindo as águas jurisdicionais, com características naturais relevantes, legalmente instituído pelo Poder Público, com objetivos de conservação e limites definidos, sob regime especial de administração, ao qual se aplicam garantias adequadas de proteção (BRASIL, 2000).

Já o Código Florestal, define como APP:

Art. 3º Para os efeitos desta Lei, entende-se por:

[...] II - Área de Preservação Permanente - APP: área protegida, coberta ou não por vegetação nativa, com a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica e a biodiversidade, facilitar o fluxo gênico de fauna e flora, proteger o solo e assegurar o bem-estar das populações humanas (BRASIL, 2012).

Ainda em conformidade com esse instrumento, dentre as APPs, destaca-se as encostas ou partes destas com declividade superior a 45°.

As áreas correlatas às UC foram obtidas junto ao Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio, 2020). Já os dados de declividade, foram extraídos de um modelo digital de elevação proveniente do SRTM.

Outras unidades de conservação (UC) poderiam ser incluídas, como é o caso daquelas de domínio estadual ou municipal. O mesmo poderia ser feito para alcançar uma maior abrangência quanto ao atendimento do Código Florestal. Contudo, dada a indisponibilidade de informações em bases de dados, torna-se inviável para a escala adotada nesta pesquisa.

CAPÍTULO 4
RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ANÁLISE DAS AVALIAÇÕES DE IMPACTOS AMBIENTAIS

4.1.1 Catalogação e categorização das AIAs de usinas fotovoltaicas no Nordeste do Brasil

Os 41 estudos ambientais analisados e suas AIAs estão organizados em 34 Relatórios Ambientais Simplificados (RAS), 2 Estudos de Impacto Ambiental com seus Relatórios de Impacto Ambiental (EIA/RIMA) e 5 Relatórios de Impacto Ambiental (RIMA). Desses, 33 estudos foram realizados no estado do Rio Grande do Norte, 6 no Ceará e 2 na Bahia. Os estudos foram elaborados nos anos de 2012 a 2019, sendo 2 em 2012, 5 em 2013, 2 em 2014, 9 em 2015, 7 em 2016, 7 em 2017, 4 em 2018 e 3 em 2019 (Tabela 8).

Tabela 8: Relação das avaliações ambientais de usinas fotovoltaicas por estado do Nordeste, tipo de estudo e ano de elaboração.

Estado	Tipo de estudo	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
RN	RAS	1	5	4	7	6	5	1	2
	EIA/RIMA	-	-	-	1	-	1	-	-
	RIMA	-	-	-	-	-	-	-	-
CE	RAS	1	-	-	-	-	1	-	-
	EIA/RIMA	-	-	-	-	-	-	-	-
	RIMA	-	-	-	-	1	-	2	1
BA	RAS	-	-	-	1	-	-	-	-
	EIA/RIMA	-	-	-	-	-	-	-	-
	RIMA	-	-	-	-	-	-	1	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Esses estudos ambientais foram elaborados por 20 empresas distintas e envolveram 240 profissionais das mais variadas áreas. Dos profissionais envolvidos na elaboração dos estudos analisados, 40 estavam ligados à avaliação de impacto ambiental, 56 foram relacionados como responsáveis pelo meio físico, 78 trabalharam no meio biótico e 66 atuaram no meio socioeconômico.

Foram identificados 3381 impactos ambientais, subdivididos em 4 fases: planejamento, implantação, operação e desativação (Figura 5). Todas as usinas fotovoltaicas (UFV) catalogadas constam na base de dados do SIGEL/ANEEL, o que significa que os estudos ambientais avaliados nesse trabalho foram analisados em seus respectivos órgãos e aprovados, pelo menos, em nível prévio de licenciamento.

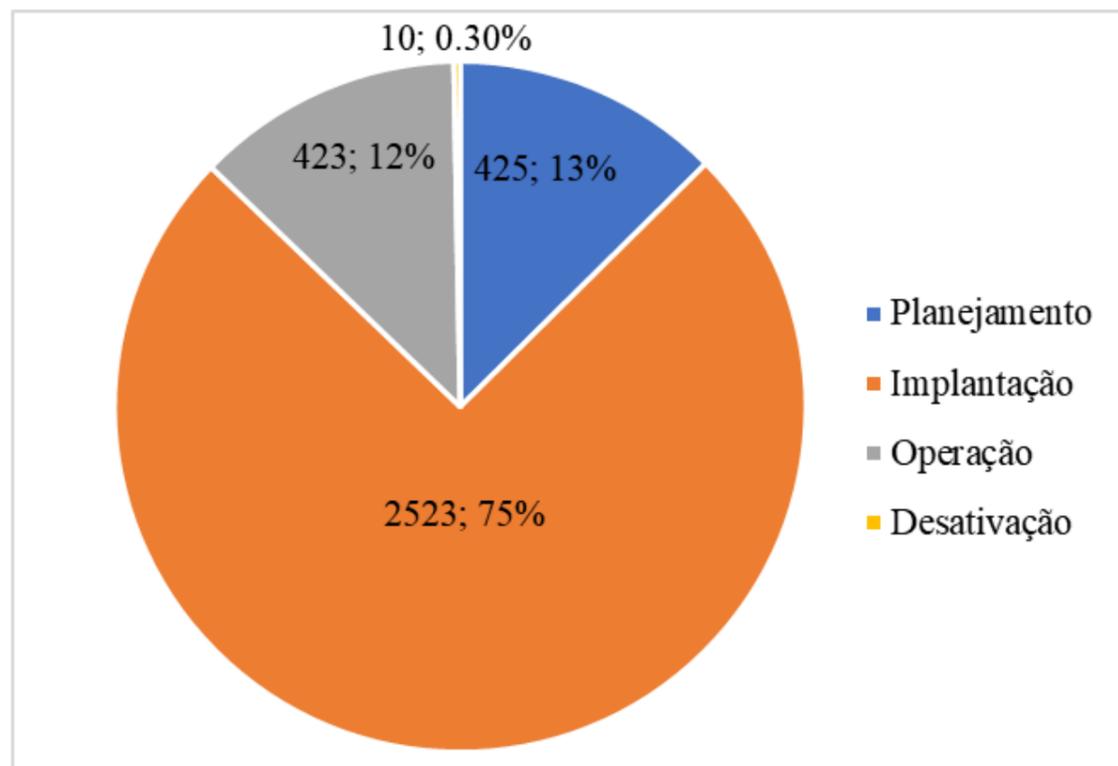


Figura 5: Quantitativo e porcentagem dos impactos ambientais por etapa do empreendimento fotovoltaico na região Nordeste.

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Dos 3381 impactos identificados na amostra, 114 possuem enunciados genéricos sem descrição suficiente para se enquadrar em um dos 3 grupos (meios) ou 15 subgrupos (componentes). Alguns desses impactos estão descritos apenas como “pesquisa e monitoramento” ou “levantamento de parâmetros” sem nenhuma informação adicional, fato que dificultou a quantificação em algum dos meios ou componentes. O meio biótico concentrou 366 impactos ambientais; no meio físico foram identificados 957; e o meio socioeconômico reuniu a maior parte, com 1944 impactos ambientais (Figura 6).

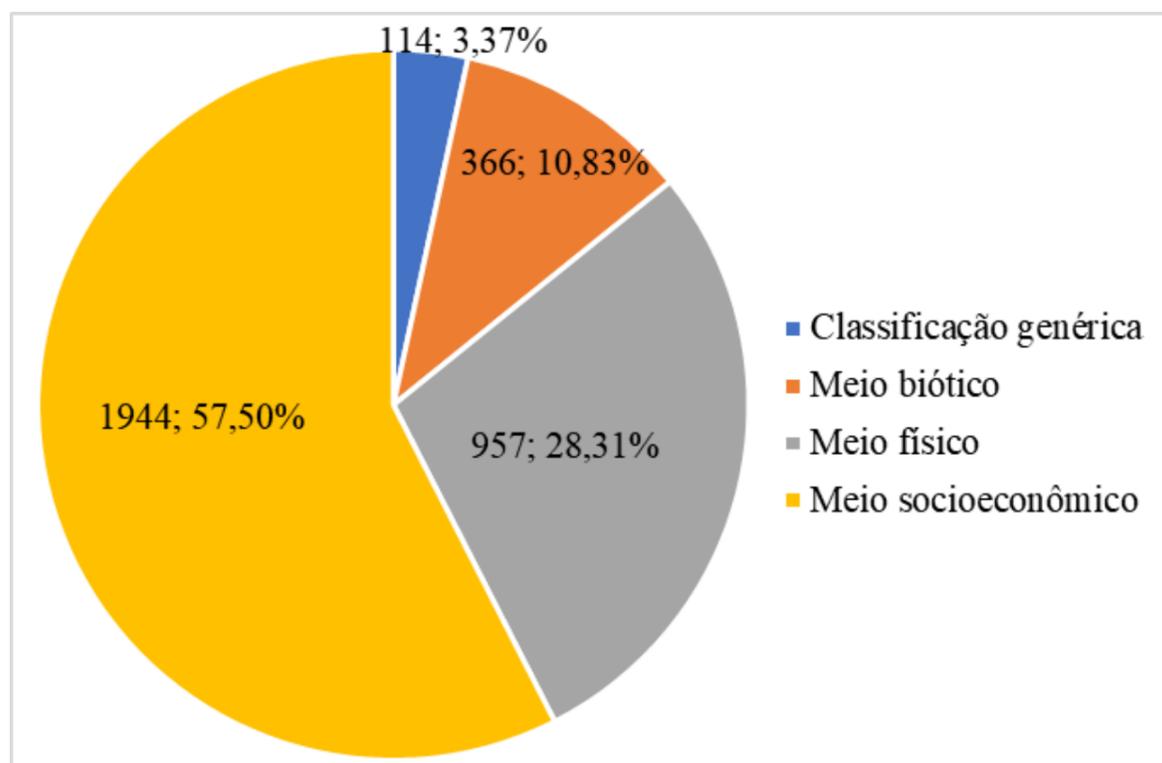


Figura 6: Quantitativo e porcentagem dos impactos ambientais por meio.

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

4.1.2 Meio biótico

O levantamento quantitativo realizado neste trabalho demonstrou que 240 impactos prognosticados (65,57%) recaem sobre a fauna de forma negativa e 60 (16,39%) impactaram negativamente o componente flora. Quanto aos impactos positivos, foram identificados 41 (11,2%) e 25 (6,83%), sobre os componentes fauna e flora, respectivamente (Figura 7). A amostra utilizada neste estudo demonstrou que os impactos no meio biótico representaram 10,83% do total.

Quando analisada sob o ponto de vista das fases do empreendimento em relação ao grupo do meio biótico, os dados apontaram para maior impacto na fase de implantação (Figura 8). Dos 240 impactos negativos sobre a fauna, 87 (43,38%) possuem enunciados e descrição ligados a “acidentes com a fauna”, especialmente durante a atividade de supressão vegetal para implantação da usina fotovoltaica. Sobre o componente flora, e de forma negativa, 45 (91,80%) dos impactos remetem a “perda da cobertura vegetal”, sendo que 14 (31,90%) desses possuem enunciados que fazem referência à perda de vegetação com alteração de habitat.

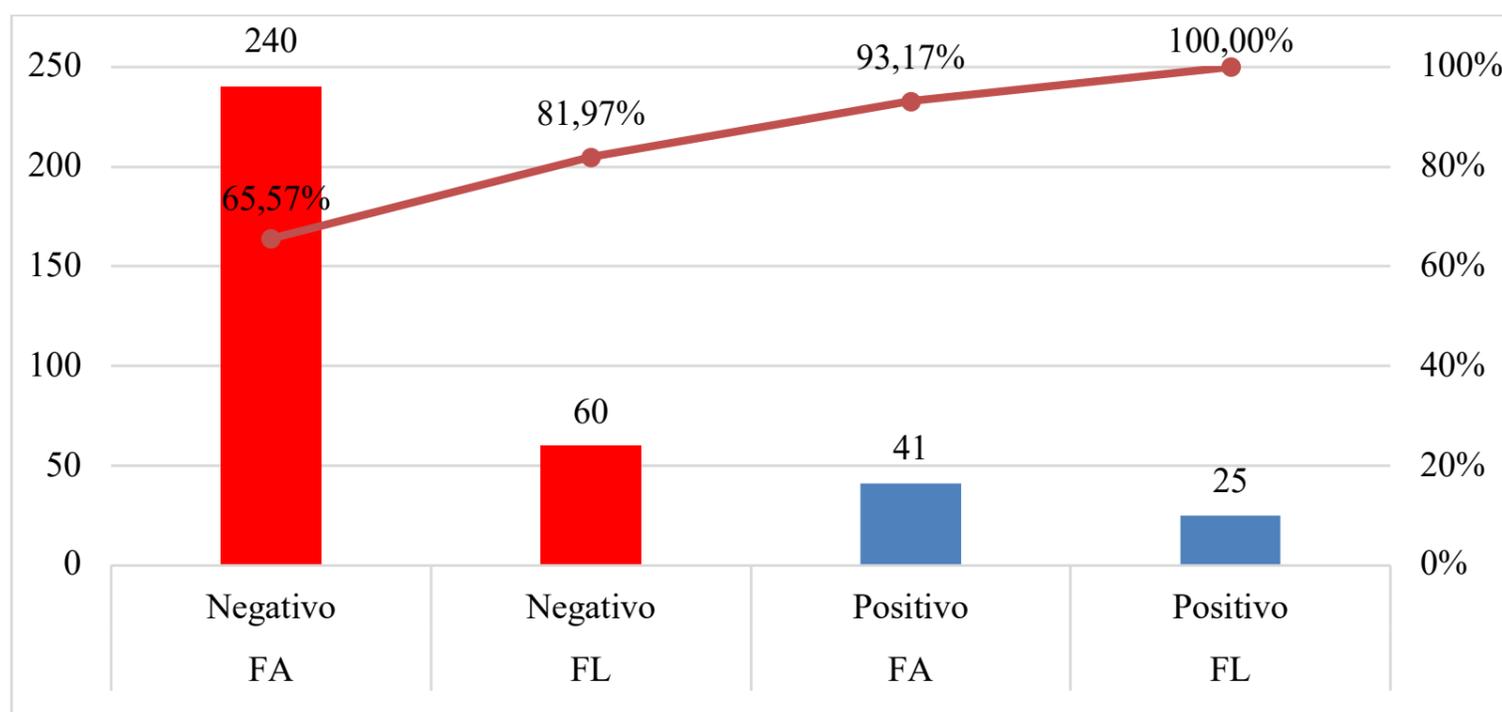


Figura 7: Quantitativo dos impactos ambientais das usinas fotovoltaicas da região Nordeste por componente para os subgrupos fauna e flora. FA = Fauna. FL = Flora.
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

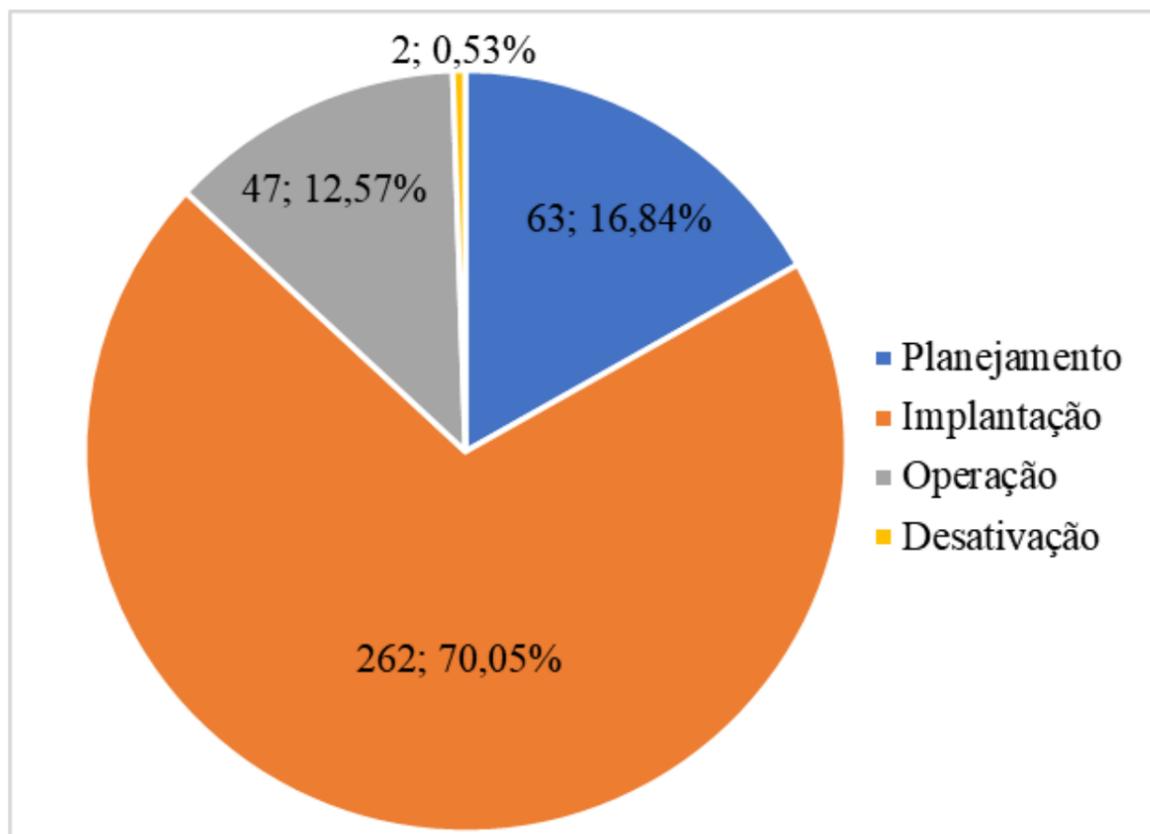


Figura 8: Impactos ambientais das usinas fotovoltaicas do Nordeste prognosticados para o meio biótico por fase.
 Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

São poucos os estudos que quantificam impactos diretos causados pela geração de eletricidade fotovoltaica na biodiversidade, especialmente em ambientes naturais com baixo nível de antropização (LOVICH; ENNEN, 2011; CAMERON; COHEN; MORRISON; NEKOLA, 2012). Contudo, as instalações de produção de energia solar resultam em impactos diretos e de diferentes escalas nos habitats locais e seus arredores, principalmente quando se trata de usinas solares de grande porte que demandam a supressão de grande volume da vegetação nativa, impactando indiretamente a vida selvagem (AMAN *et al.*, 2015; HOSENUZZAMAN *et al.*, 2015; MOORE-O'LEARY *et al.*, 2017).

Face a tais aspectos, 9,7% das instalações fotovoltaicas, em construção e em operação, situadas no estado da Califórnia (EUA) são classificadas como incompatíveis, devido à implantação em habitat de espécies ameaçadas e em perigo. Como consequência, nota-se a fragmentação do habitat natural resultando em problemas ecológicos diretos e indiretos, que podem incluir maior isolamento e invasões de espécies não nativas e o comprometimento do potencial de movimento de espécies em resposta aos distúrbios ambientais (HERNANDEZ *et al.*, 2015).

Condições semelhantes também são verificadas na Romênia, especificamente na Planície do Baixo Danúbio, onde quase 45% das usinas fotovoltaicas estão localizadas a menos de 2 km de florestas. Esse cenário evidencia o risco de os ecossistemas florestais serem afetados pelos sistemas solares em processo de instalação e também durante os

serviços de manutenção e reparação (VRÎNCEANU *et al.*, 2019). Ainda em conformidade com Vrînceanu *et al.* (2019), a distribuição espacial das linhas de transmissão também pode ter impactos ecológicos negativos relacionados à fragmentação do habitat, deslocamento de vida selvagem e remoção da cobertura vegetal.

Ao analisar o impacto direto sobre a fauna, são estimados entre 16.200 e 59.400 fatalidades de aves por ano nas instalações de usinas fotovoltaicas somente no sul da Califórnia (EUA). Afirma-se ainda que em todas as instalações, em operação ou em construção nos Estados Unidos, esse quantitativo pode variar entre 37.800 e 138.600 mortes de pássaros por ano (WALSTON JR *et al.*, 2016). Ao encontro dessa questão, estudos realizados em *New South Wales*, Austrália, revelaram que as aves são o grupo mais afetado pelas usinas fotovoltaicas, seguido da microfauna e dos insetos (GUERIN, 2017).

Conforme Ho (2016), o principal fator que explica a mortandade de pássaros são as colisões, responsáveis por até 81% das fatalidades, e a incineração, devido às grandes quantidades de energia refletidas pelos painéis solares. No caso dos insetos, em especial as espécies aéreas, a ocorrência mais agravante também é a incineração.

4.1.3 Meio físico

A amostra revelou que 957 (28,31%) dos impactos prognosticados aconteceram no meio físico, sendo a maior parte concentrada no subgrupo solo, com 277 (28,94%) negativos e 85 (8,88%) positivos. O subgrupo clima e qualidade do ar figurou como o segundo mais impactado, com 134 (14,00%) alterações negativas e 33 (3,45%) positivas, seguido por intervenções no subgrupo dos recursos hídricos com 123 (12,85%) negativas e 35 (3,66%) positivas (Figura 9).

A maior parte dos impactos previstos nos estudos ambientais analisados, para o grupo do meio físico, ocorreram na etapa de implantação onde foram detectados 1007 (82%); seguido pela etapa de planejamento, com 113 (9,20%); e operação 104 (8,47%) (Figura 10). Dos impactos prognosticados para a etapa de implantação, 888 (72,31%) são negativos e 206 (27,69%) foram classificados como positivos. A etapa de planejamento apresentou 100% dos impactos do meio físico como positivos sempre os ligando a “geração de conhecimento técnico-científico” nos 5 subgrupos (componentes).

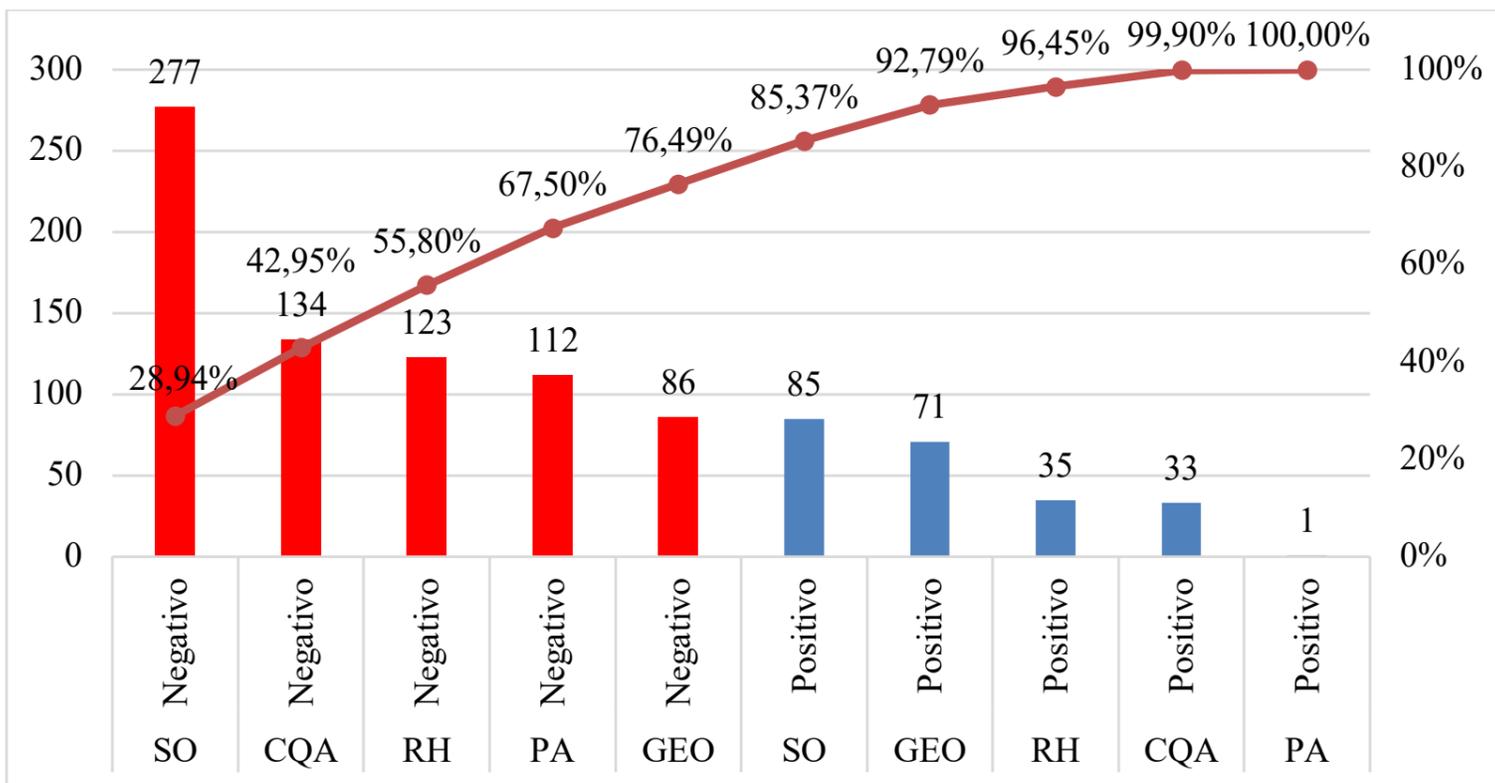


Figura 9: Quantitativo dos impactos ambientais das usinas fotovoltaicas da região Nordeste por componente para o meio físico. SO = Solo. CQA = Clima e Qualidade do Ar. RH = Recursos Hídricos. PA = Paisagem. GEO = Geologia e Geomorfologia.

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

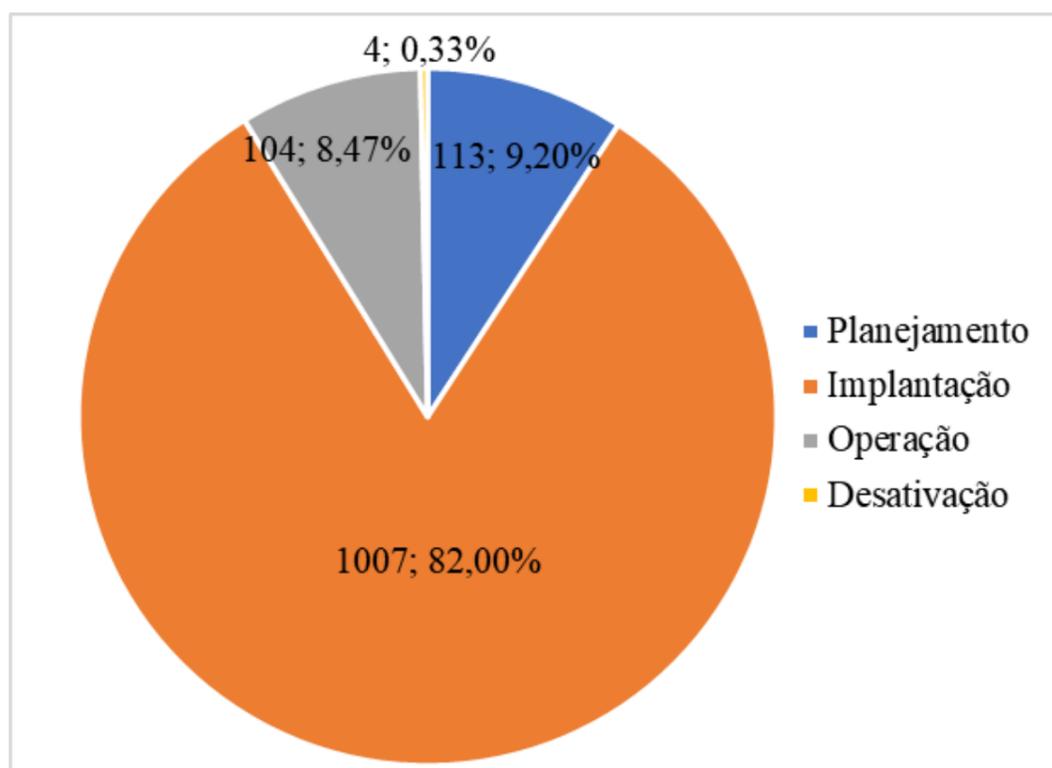


Figura 10: Impactos ambientais das usinas fotovoltaicas do Nordeste prognosticados para o meio físico em relação às fases da atividade.

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Em relação ao meio físico, os sistemas fotovoltaicos permitem uma diversidade de impactos, tanto positivos quanto negativos. Exemplos clássicos quanto aos benefícios desses empreendimentos são o aproveitamento de áreas degradadas e a redução da emissão de gases do efeito estufa durante a operação (RABAIA *et al.*, 2021). Contudo, também se faz necessário elencar os fatores adversos, como a erosão e contaminação do solo; ocorrência de poluição dos corpos hídricos; poluição térmica, sonora e luminosa; o

surgimento de efeitos de campo eletromagnético e as mudanças no microclima (VRÎNCEANU *et al.*, 2019).

Diante dessas questões, nota-se que a geração fotovoltaica tende a se concentrar nas terras áridas do planeta (HERNADEZ; HOFFACKER; FIELD, 2014) onde, geralmente, ocorrem altas taxas de transporte eólico de sedimentos, como areia e poeira. Parte do sedimento que o vento transporta é retido pela vegetação presente na região, entretanto, a instalação de usinas fotovoltaicas requer modificação quase completa do uso do solo, com alterações ligadas a remoção da vegetação, terraplanagem, compactação do solo e construção de acessos internos e externos, resultando no aumento da perda de solo pela ação do vento e da chuva (FIELD *et al.*, 2010; MUNSON; BELNAP; OKIN, 2011).

Devido a sua variada composição, a emissão de poeira, a partir das modificações do solo, impacta uma variedade de componentes ambientais tais como o ciclo hidrológico e o clima local (PAINTER *et al.*, 2010; RAVI *et al.*, 2011). Por sua vez, para minimizar a produção de poeira, de modo a evitar a deposição sobre os módulos fotovoltaicos, podem ser implementados sistemas de irrigação, responsáveis pelo aumento do consumo de água para aspersão sobre o solo exposto (MUNSON; BELNAP; OKIN, 2011).

Em conformidade com Dhar *et al.* (2020), esses impactos adversos, de maneira direta ou indireta, influenciam nas propriedades físicas e químicas do solo. Logo, devido à redução da infiltração tende a ocorrer a diminuição da recarga dos mananciais de água subterrânea, a perda de carbono orgânico do solo e o aumento da carga de sedimentos nos corpos hídricos superficiais. Os autores Dhar *et al.* (2020) afirmaram que a impermeabilização do solo aumenta a probabilidade de inundações além de causar alterações no clima. Isso ocorre devido ao desequilíbrio causado no balanço de energia, especialmente no que concerne à evapotranspiração.

Em relação à poluição sonora, como os módulos fotovoltaicos não contêm partes móveis ou giratórias não há poluição sonora significativa produzida durante a operação. Por sua vez, durante a fase de construção muitas máquinas e veículos pesados operam no local, o que causa poluição sonora para residências, viajantes e vida selvagem (TAWALBEH *et al.*, 2021).

Ao discutir os impactos visuais, Guerin (2017) afirmou que uma usina fotovoltaica estudada no leste da Austrália já podia ser vista a 16 km de distância, mesmo situada numa área envolta por floresta. Guerin (2017) ainda fez referência à linha de transmissão que possui altura superior à vegetação. Todavia, trata-se de um impacto de baixa magnitude, uma vez que não resultou em reclamações durante ou após a implantação.

A geração de eletricidade fotovoltaica utiliza pouca água (0,02 m³/MWh), especialmente quando comparada à fonte solar térmica (3,07 m³/MWh), e concentra o seu uso apenas para limpeza dos painéis e para supressão de poeira entre os módulos (FTHENAKIS; KIM, 2010; AMAN *et al.*, 2015). Atualmente, o uso de água para limpeza de painéis é a forma mais comum para remoção de poeira em usinas fotovoltaicas, representando cerca de 40% do volume utilizado na fotovoltaica enquanto a aspersion de água para controle de poeira representa de 60-99% do total (RAVI *et al.*, 2011).

Estudos recentes demonstraram que o consumo de água, durante a etapa de operação das usinas solares, pode aumentar devido à necessidade de resfriamento dos painéis. Esse aspecto pode ser explicado pelo aumento expressivo da temperatura que, por sua vez, reduz substancialmente o rendimento das células fotovoltaicas. Contudo, é possível minimizar o consumo hídrico a partir da recirculação da água no sistema (TAWALBEH *et al.*, 2021; RABAIA *et al.*, 2021).

Dos 3381 impactos ambientais catalogados, nenhum cita o consumo de água como sendo um problema a se considerar em nenhuma das fases da atividade de geração de eletricidade fotovoltaica. Os impactos ambientais que se referem aos recursos hídricos estão ligados diretamente ao risco de contaminação ou poluição e a eventual interação prejudicial de alguma estrutura do empreendimento nos corpos d'água presentes na área. Escoamento, assoreamento e alteração de regime hídrico são os impactos mais citados nos 41 estudos ambientais analisados.

4.1.4 Meio socioeconômico

Os dados estudados nesse trabalho demonstraram que o meio socioeconômico é o segmento sobre o qual incide a maior quantidade de impactos face às atividades e etapas atreladas aos empreendimentos de geração de eletricidade fotovoltaica no Nordeste do Brasil. Dos 3381 impactos, 1779 (52,62%) foram prognosticados pelos especialistas como sendo alterações incidentes no meio socioeconômico, sendo o subgrupo economia local e regional o mais impactado positivamente, com 562 (28,91%) nos 41 estudos ambientais analisados (Figura 11).

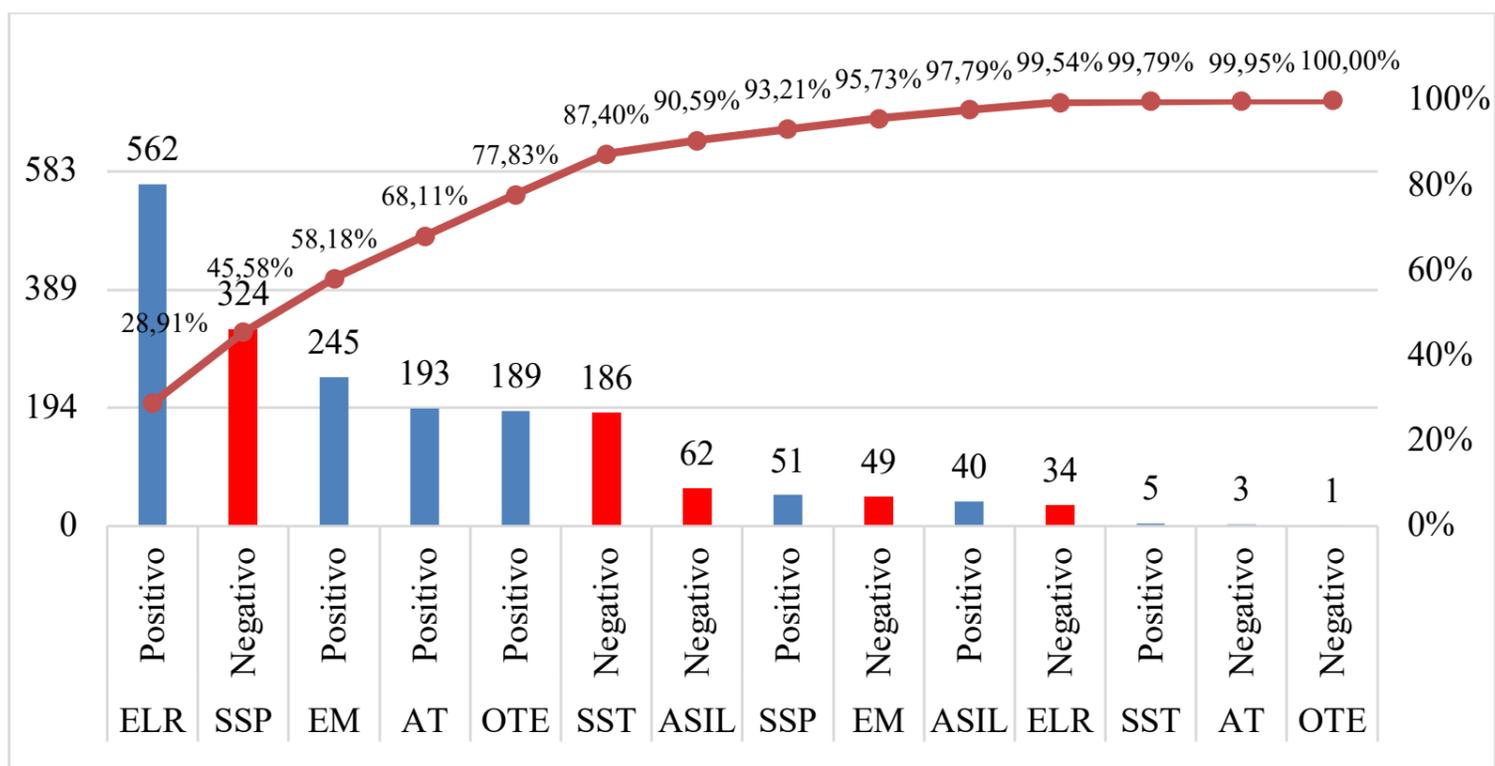


Figura 11: Quantitativo dos impactos ambientais das usinas fotovoltaicas da região Nordeste por componente para o meio socioeconômico. ELR = Economia Local e Regional. SSP = Saúde e Segurança da População. EM = Empregos. AT = Arrecadação Tributária. OTE = Ordenamento Territorial e Energia. SST = Saúde e Segurança do Trabalhador. ASIL = Aspectos Sociais e Infraestrutura Local.

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Apesar da grande expressividade dos impactos positivos, o subgrupo saúde e segurança da população chama a atenção por ser o segundo mais citado da amostra e por predominar impactos de natureza negativa, com 324 (16,67%) contra 51 (2,62%) positivos. Os impactos de natureza negativa, em números, são maiores, inclusive, do que no subgrupo (componente) emprego, que foram quantificados em 245 (12,60%) impactos positivos. Os impactos de geração de emprego, geralmente, são apresentados como o maior benefício de grandes empreendimentos.

Os estudos, em sua maioria, apontaram como maior causador de impacto no meio socioeconômico a etapa de implantação, com 1254 dos 3381 (70,49%). As etapas de operação e planejamento aparecem em seguida com 272 (15,29%) e 249 (14,00%), respectivamente (Figura 12).

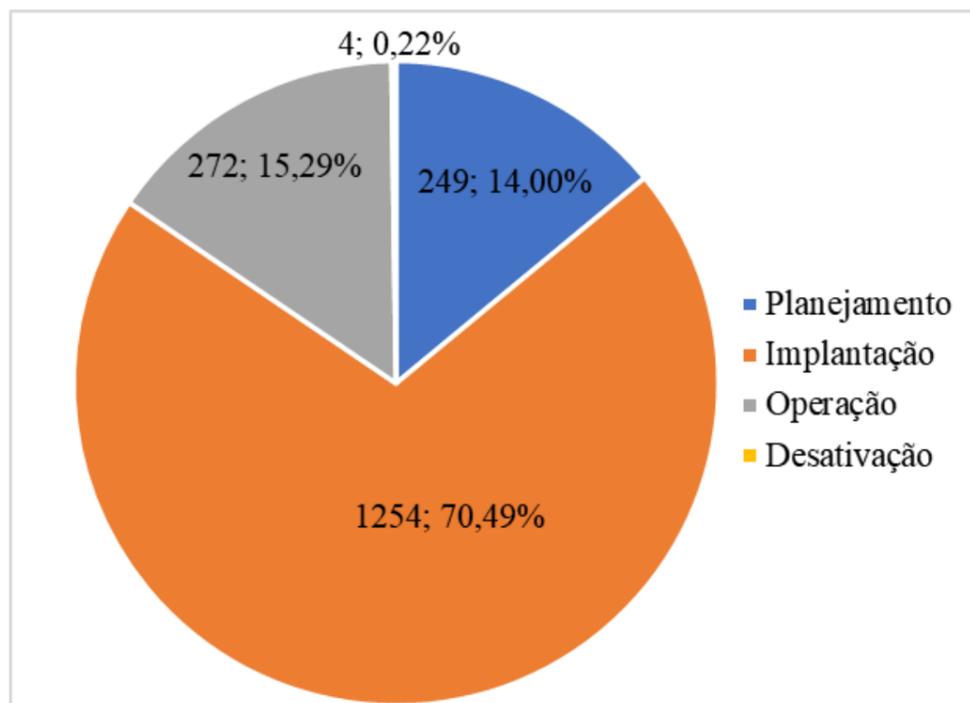


Figura 12: Impactos ambientais das usinas fotovoltaicas do Nordeste prognosticados para o meio socioeconômico, em relação às fases do empreendimento.

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

As usinas de energia solar fotovoltaica fornecem amplos benefícios socioeconômicos, como maior independência energética regional ou nacional, maiores oportunidades de trabalho, fornecimento de energia diversificada e segura, menor custo social e promoção da eletrificação rural em países em desenvolvimento (DHAR *et al.*, 2020). Em aldeias na Índia, onde o acesso à rede elétrica possui uma série de inviabilidades de caráter técnico e econômico, percebeu-se que a implementação de sistemas solares trouxe consigo benefícios socioeconômicos diversos, como a facilitação das atividades econômicas das famílias beneficiárias, melhora no desempenho acadêmico das crianças, melhoria nas condições de saúde e saneamento das famílias, incrementos a comunicação e acesso ao entretenimento e à cultura (MISHRA; BEHERA, 2016).

Dentre os fatores econômicos, nota-se que devido a demanda por grandes áreas, a instalação de usinas solares tende a desencadear conflitos pelo uso da terra, principalmente com as atividades agrícolas. Esse aspecto pode ser entendido como um fator adverso no segmento de ordenamento do território (VRÎNCEANU *et al.*, 2019). Em países com territórios pequenos e com grandes populações, observa-se que este é um grande impasse que reverbera diretamente na questão econômica, devido aos preços elevados das propriedades e a pouca disponibilidade de áreas (AMAN *et al.*, 2015).

Quanto à saúde da população, as projeções de Hosenuzzaman *et al.* (2015) indicaram que muitas doenças graves estão associadas à presença de NO_x e SO₂ na atmosfera, em especial aquelas que recaem sobre os sistemas cardiovascular e respiratório, emitidos em grandes quantidades com a queima de combustíveis fósseis,

como o carvão, a gasolina, o diesel e o querosene. Logo, por não promover o lançamento desses poluentes, a geração da energia solar traz significativos benefícios à saúde humana.

Entretanto, a redução da qualidade do ar, devido à dispersão de partículas de poeira ou compostos tóxicos gera impactos à saúde dos funcionários em diferentes estágios de instalação, operação e manutenção. Também podem ocorrer riscos devido à contaminação dos corpos hídricos, fator resultante do aumento do carreamento de sedimentos (VRÎNCEANU *et al.*, 2019).

Segundo os 41 estudos ambientais analisados, a economia local e regional é uma das mais beneficiadas quando se implanta uma UFV, e isso contribui para a tipologia do empreendimento ser aceito, até mesmo solicitado em algumas regiões. Essa aceitação é descrita por Vanclay *et al.* (2015) como fundamental para evitar o conflito de interesse entre as comunidades afetadas, empreendedores e outros atores do processo sob pena de causar a não implantação do empreendimento.

Os estudos ambientais analisados apontaram para o aquecimento da economia local e regional durante a fase de implantação dos empreendimentos fotovoltaicos como sendo o principal ganho socioeconômico, gerando dinamização econômica no comércio e no setor de serviço local, especialmente a partir da população flutuante que as cidades recebem.

De maneira simplificada, a Figura 13 apresenta um quadro resumo dos resultados obtidos a partir da análise dos estudos de impactos ambientais, considerando os grupos, subgrupos e as etapas do empreendimento.

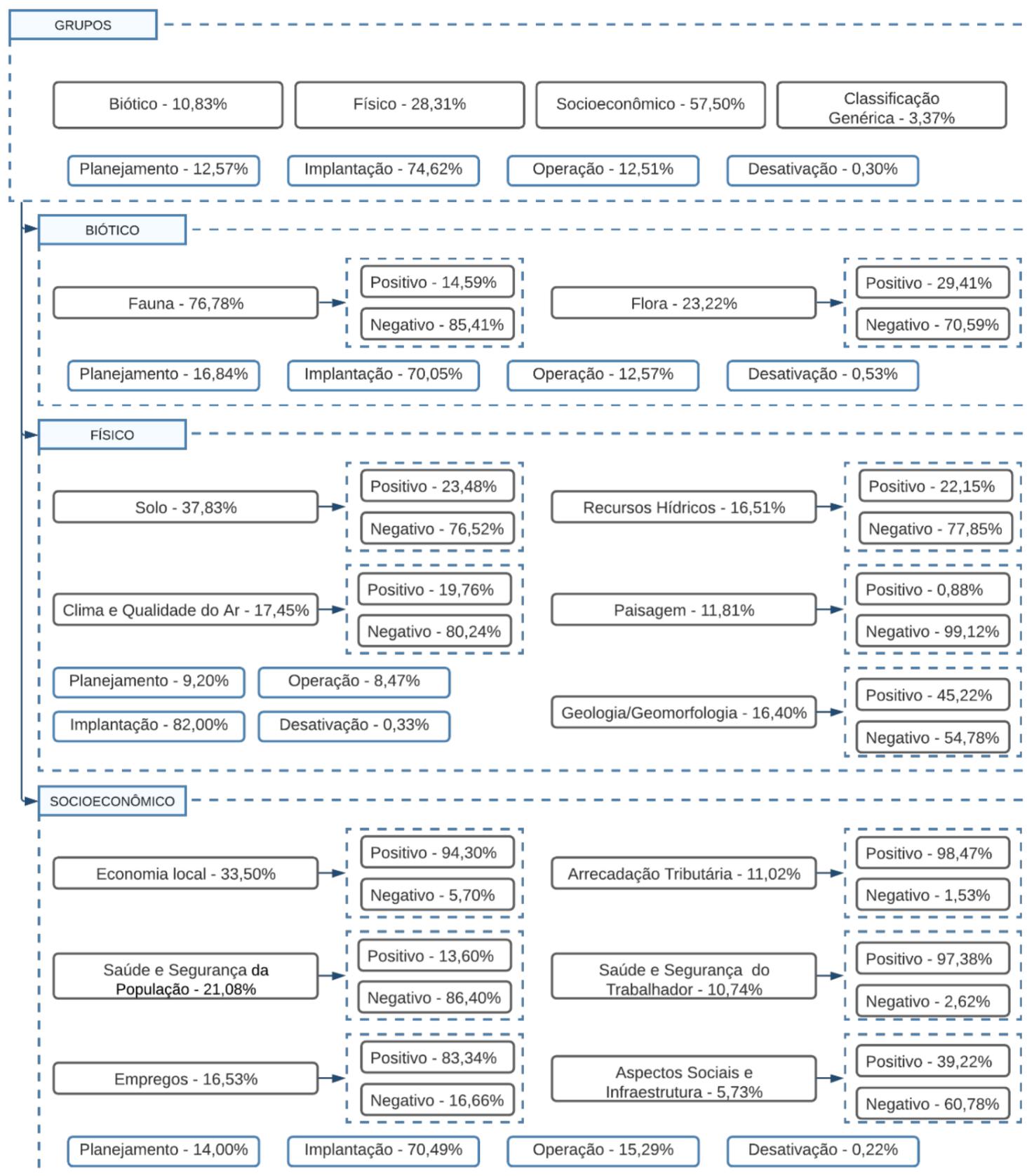


Figura 13: Síntese dos resultados obtidos a partir da análise dos EIA.

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

4.2 POTENCIAL BIOFÍSICO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA

4.2.1 Declividade

Ao analisar o relevo da região Nordeste (Figura 14), percebe-se que prevalece a classe de declividade plana, isto é, na faixa entre 0% e 3%, que corresponde a 64,65% do território. Na sequência estão as classes suavemente ondulada, equivalente a 23,69% da

superfície, e ondulado, que recobre 10,24%. As classes fortemente onduladas (1,41%) e montanhosa (0,01%) somam 1,42% (Tabela 9).

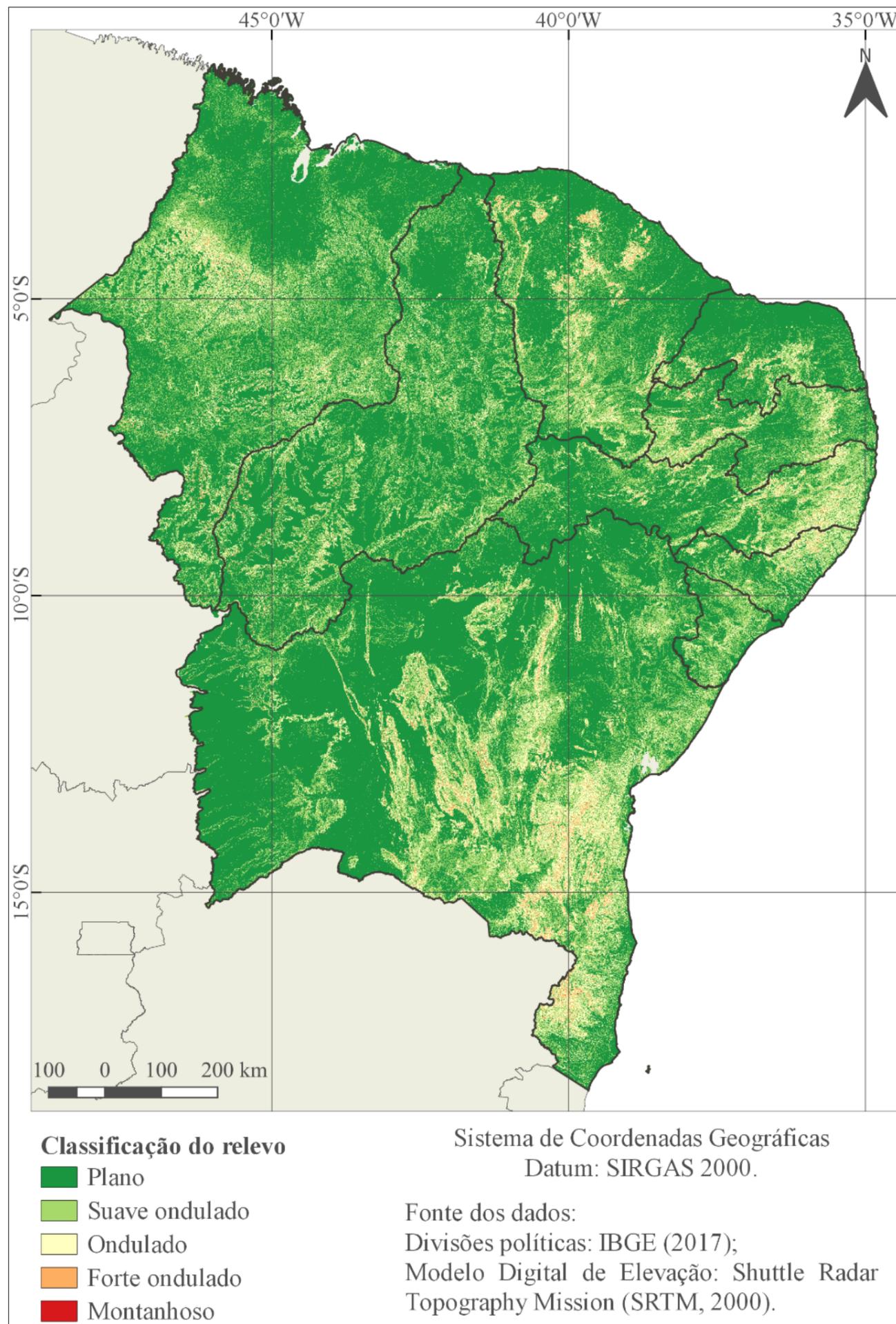


Figura 14: Mapa de declividade da região Nordeste.

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

No que concerne às áreas propícias para a implantação de usinas fotovoltaicas, estas se limitam às porções nas quais o relevo varia de 0% a 5%, isto é, as localidades

caracterizadas com declividades “plana” ou “levemente ondulada”. Essas, por sua vez, totalizam 1.239.126,96 km², valor correspondente a aproximadamente 78,44% do território regional. Com isso, nota-se que o relevo nessa região, de maneira geral é um elemento que favorece a implantação e expansão da geração de energia fotovoltaica.

Tabela 9: Classificação da declividade da região Nordeste.

CLASSES	ÁREA (km ²)	%
Plano	1.021.372,20	64,65%
Suave ondulado	374.267,13	23,69%
Ondulado	161.807,40	10,24%
Forte ondulado	22.247,32	1,41%
Montanhoso	97,72	0,01%

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Conforme ilustrado, percebe-se que as áreas menos favoráveis para a implantação de usinas fotovoltaicas, considerando-se as condições de relevo, estão majoritariamente concentradas nas porções sul e leste da região sobre os estados da Bahia, Pernambuco e Alagoas, respectivamente. Ademais, também são notadas faixas menos compatíveis na parte oeste do estado do Maranhão e no centro do Ceará. Com vista a tais configurações físicas, nota-se que o estado do Piauí e a porção norte do Rio Grande do Norte configuram as áreas mais propícias para a implantação de usinas fotovoltaicas.

A declividade, sob a ótica da escolha de áreas para a instalação de usinas fotovoltaicas, é entendida como um critério econômico (YOUSEFI; HAFEZANIA; SAHZABI, 2018). Já na percepção de Guaita-Pradas *et al.* (2019), configura um critério ambiental, que descreve as características externas, isto é, de superfície do solo.

Acerca da importância desse aspecto, destaca-se que a declividade impacta diretamente no custo de instalação e, por consequência, na viabilidade técnica e econômica (AZEVEDO; CANDEIAS; TIBA, 2017). Ainda em conformidade com os autores, as localidades onde a declividade se mostra superior a 5% tendem a apresentar menor aptidão para esse segmento energético. Neste sentido, quanto menor a inclinação, maior a quantidade de energia solar recebida, logo, maior a adequação do local. Áreas planas e suavemente onduladas também permitem reduzir os custos atrelados à preparação dos terrenos, desde que permitam a realização da drenagem natural do solo (IZEIROSKI *et al.*, 2018; REDISKE *et al.*, 2019).

4.2.2 Irradiação Global Horizontal

A irradiação solar é o critério mais importante para a instalação de sistemas fotovoltaicos (CHOI; SUH; KIM, 2019). Ao analisar o comportamento da Irradiação Global Horizontal na região Nordeste (Figura 15) percebe-se que os valores apresentados pelo INPE (2017) variam entre 4.583 Wh/m²dia e 6.120 Wh/m²dia, sendo a faixa central correspondente à porção oeste dos estados da Paraíba, Pernambuco e Bahia e os territórios dos estados do Rio Grande do Norte, Ceará e do Piauí, as áreas com os valores mais elevados.

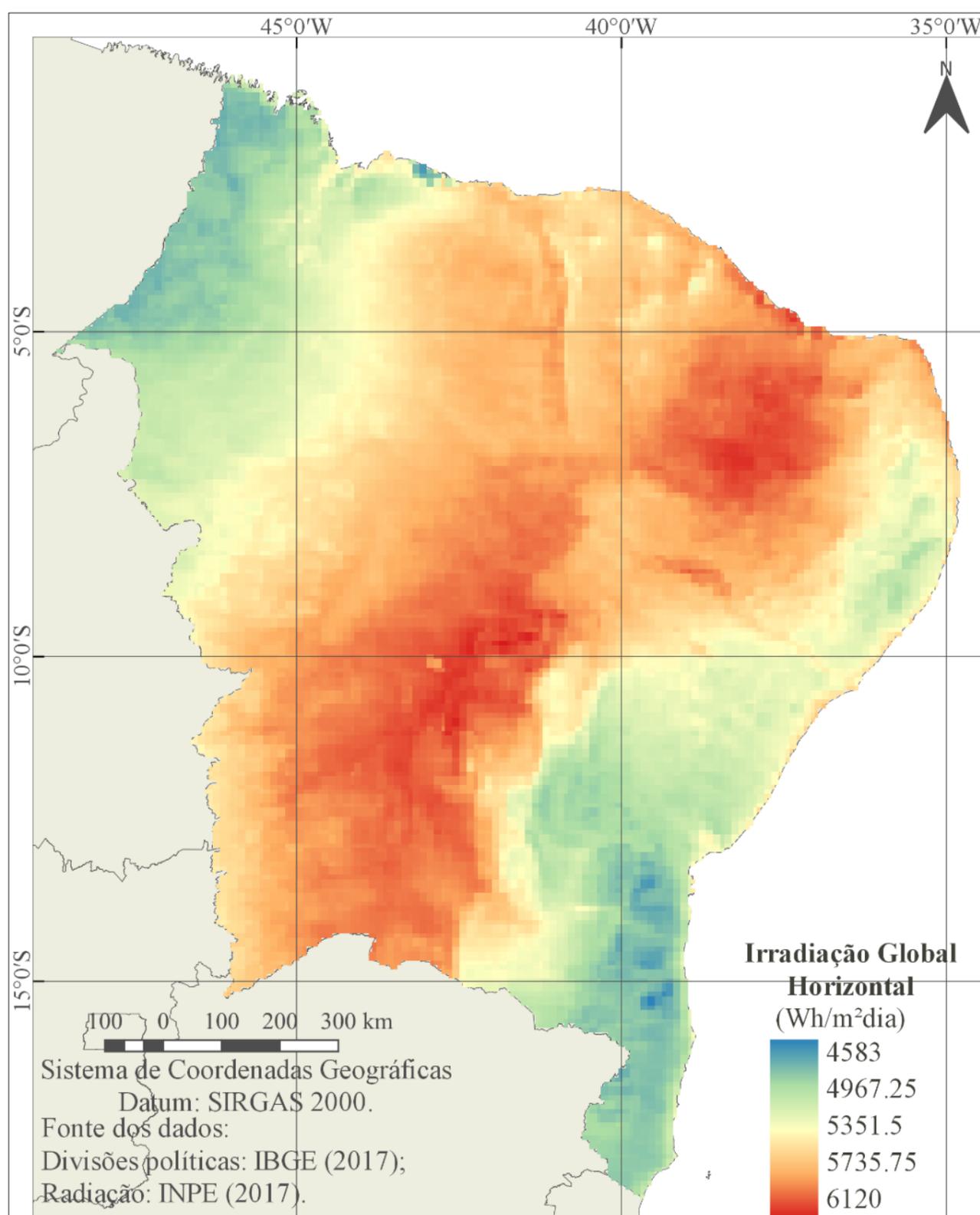


Figura 15: Mapa de irradiação global horizontal do Nordeste do Brasil.
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Quanto às áreas com menor incidência de radiação, dá-se destaque ao estado do Maranhão e à faixa litorânea do sul da Bahia ao extremo norte de Pernambuco. Contudo, mesmo nas áreas com menor disponibilidade de irradiação, nota-se que os valores se apresentam substancialmente satisfatórios para a geração de energia fotovoltaica, visto que estudos realizados em outras localidades do Brasil apresentam valores abaixo dos descritos nesta análise e tem a radiação classificada como boa para essa finalidade (JONG *et al.*, 2019; CARPIO, 2021).

Resultados semelhantes são apresentados por Akkas *et al.*, (2017) que realizaram um estudo para determinar áreas ideais para instalação de usinas fotovoltaicas na região da Anatólia, na Turquia. Conforme os autores, essa é uma região propícia para o segmento fotovoltaico, tendo em vista a irradiação solar mais alta quando comparada com outras localidades.

Diante disso, algumas considerações são feitas acerca do mapeamento da radiação solar e a aplicação em pesquisas orientadas à locação ótima de usinas fotovoltaicas. Esse mapeamento disponibiliza um banco de dados muito útil por facilitar a identificação de recursos solares em áreas específicas, permitindo a delimitação de áreas adequadas de alto potencial solar fotovoltaico, elemento crítico no desenvolvimento de políticas de planejamento e financiamento de projetos (CHOI; SUH; KIM, 2019).

4.2.3 Cobertura do solo

A geração de energia fotovoltaica, mesmo sendo considerada como uma das alternativas menos poluentes, apresenta uma série de impactos negativos, incidentes sobre os ecossistemas. Neste contexto, é válido enfatizar que devido ao fato de ocupar grandes áreas, a construção de usinas fotovoltaicas pode demandar a remoção da cobertura vegetal, culminando em perdas da biodiversidade e modificações da paisagem, além de favorecer a intensificação dos processos erosivos e o aumento da temperatura da superfície do solo (MOORE-O'LEARY *et al.*, 2017; GUILLER *et al.*, 2017; RABAIA *et al.*, 2021).

Ao analisar as classes de cobertura do solo na região Nordeste (Figura 16) para o ano de 2020, verificou-se que as classes predominantes correspondem ao solo exposto/área urbana (22,58%), vegetação com atividade fotossintética baixa (23,13%) e vegetação com atividade fotossintética moderadamente baixa (24,54%).

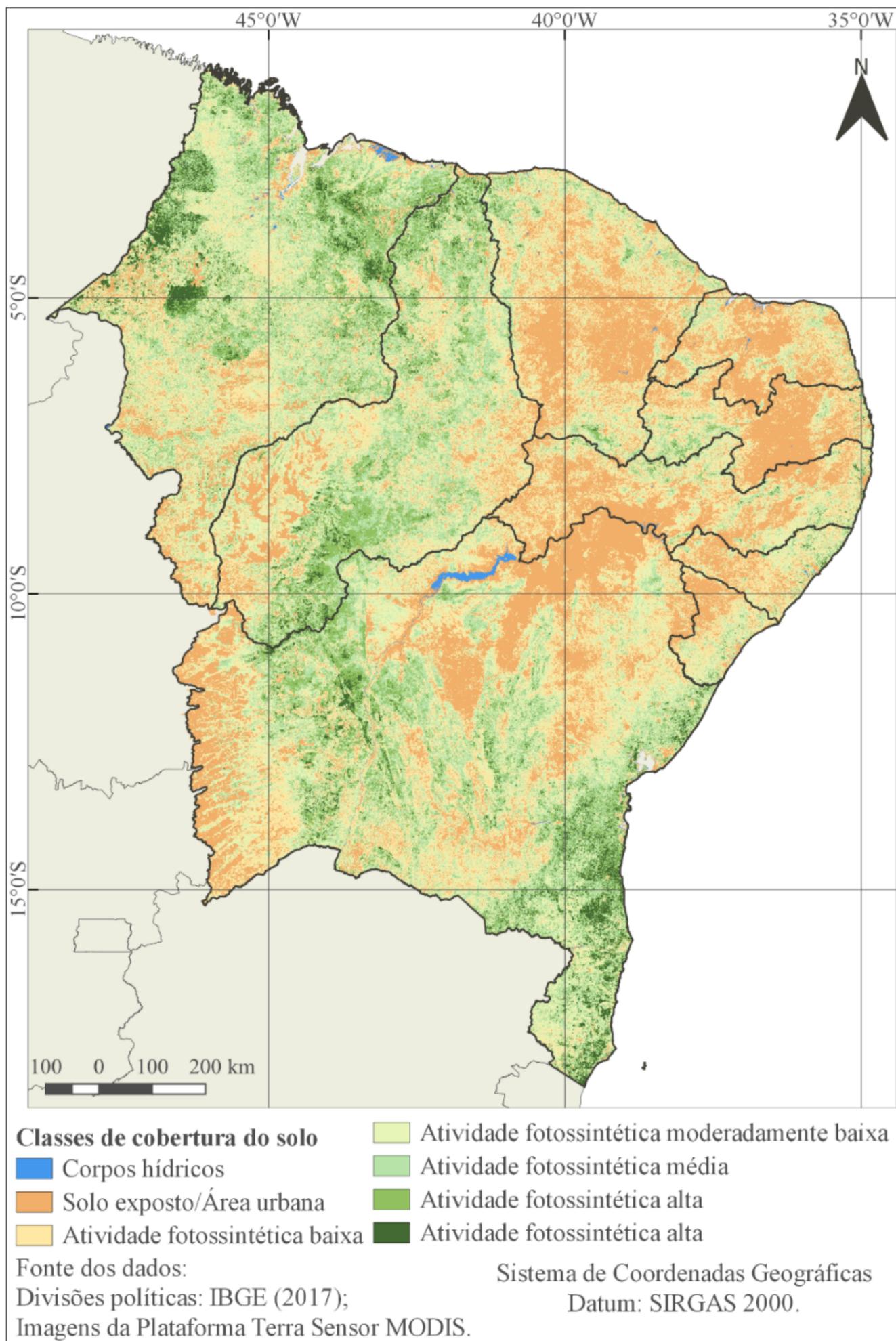


Figura 16: Mapa de classificação de cobertura do solo (NDVI) da região Nordeste do Brasil.

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Quanto às demais classes, nota-se que a cobertura com vegetação média e moderadamente alta correspondem a 17,12% e 9,56%, respectivamente, enquanto os corpos hídricos e a vegetação com atividade fotossintética alta representam as menores frações da cobertura da superfície (Tabela 10).

Tabela 10 Classes de cobertura do solo encontradas na região Nordeste.

CLASSES	ÁREA (km ²)	%
Corpos hídricos	5791,01	0,37%
Solo exposto/Área urbana	356770,86	22,58%
Atividade fotossintética baixa	365370,80	23,13%
Atividade fotossintética moderadamente baixa	387702,35	24,54%
Atividade fotossintética média	270526,31	17,12%
Atividade fotossintética moderadamente alta	151097,71	9,56%
Atividade fotossintética alta	42532,72	2,69%

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Garni e Awasthi (2017) afirmaram que na atualidade há diversos modelos que apoiam a tomada de decisão para a identificação de locais adequados para a implantação de empreendimentos destinados à geração de energias renováveis. Contudo, ainda em consonância com os autores, é pertinente inserir a vegetação como um dos critérios de decisão, de modo a conferir maior robustez e possibilitar a redução dos impactos adversos.

Ao encontro desta realidade, Guaita-Pradas *et al.* (2019) afirmaram que os locais ideais para a implantação de usinas fotovoltaicas, em termos de cobertura vegetal, são aqueles com vegetação rasteira, arbustos, gramíneas, áreas agrícolas, áreas exploradas ou estéreis. Já as porções que apresentam vegetação densa são ambientalmente menos favoráveis, devido à importância ecológica, por haver maiores custos associados à supressão vegetal e aberturas de acessos, além da formação de sombras que reduzem o desempenho das células fotovoltaicas.

Considerando-se esses argumentos, ao longo da análise da cobertura do solo, as áreas com menor atividade fotossintética foram consideradas mais propícias para a instalação de empreendimentos destinados à geração de energia fotovoltaica e dadas as condições locais, percebe-se por este fator que a região Nordeste possui uma aptidão ambiental natural para esse segmento (Tabela 11).

Tabela 11: Padronização da cobertura do solo para a região Nordeste.

INTERVALOS DO NDVI	COMPATIBILIDADE	ÁREA (km ²)	%
-0,157 a 0,089	0%	5.791,01	0,37%
0,089 a 0,627	100%	722.141,66	45,71%
0,627 a 0,785	75%	658.228,66	41,67%
0,785 a 0,838	50%	151.097,71	9,56%
0,838 a 1,000	25%	42532,72	2,69%

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

A partir das informações apresentadas, nota-se que aproximadamente 45,71% do território correspondente à região Nordeste possui condições de cobertura do solo totalmente compatíveis com a instalação de usinas fotovoltaicas e 41,67% são 75% compatível. As áreas em que a compatibilidade corresponde a 50% totalizam aproximadamente 151 mil km², enquanto as porções 25% compatíveis equivalem a somente 2,69%. A compatibilidade de 0% corresponde aos corpos hídricos.

Estudos realizados na Sérvia, para avaliar as condições naturais para instalação de usinas fotovoltaicas, empregaram o NDVI com a finalidade de determinar a cobertura do solo, permitindo classificar as áreas com boas coberturas de vegetação como prioritárias para conservação. Logo, consiste em um elemento útil diante do processo decisório, com vistas à conservação ambiental e implementação de planos e estratégias para uso de energia solar (DOLJAK; STANOJEVIC, 2017).

4.2.4 Potencial biofísico

A partir dos elementos apresentados anteriormente, por meio da Equação 1, calculou-se o percentual biofísico para geração de energia fotovoltaica da região Nordeste (Tabela 12 e Figura 17). Considerando-se as condições de contorno definidas, verificou-se que o potencial biofísico é variável entre 37,73% e 99,74% e compatibilidade com a geração de energia solar fotovoltaica.

A maior parcela do Nordeste possui um elevado potencial para geração de energia fotovoltaica. As áreas menos propícias correspondem à porção sul do estado da Bahia e o leste do estado do Maranhão. Já os estados do Rio Grande do Norte, Ceará, Paraíba e Pernambuco são os estados com maior aptidão. Considerando tais aspectos, é pertinente quantificar intervalos do potencial.

Tabela 12: Intervalos do potencial biofísico para geração de energia fotovoltaica no Nordeste do Brasil.

INTERVALOS	ÁREA (km ²)	ÁREA (%)
0%	85.251,88	5,47%
37,73% - 58,40%	149.184,86	9,58%
58,40% - 79,04%	434.443,14	27,88%
79,04% - 99,74%	889.120,13	57,07%

Fonte: Autor (2021).

Somente 5,47% do território foi categorizado como não-propício, correspondente às áreas definidas como unidades de conservação federal, que correspondem a 83.659,3 km², e às áreas que caracterizam áreas de preservação permanente, por possuírem declividade do relevo superior a 45°, 1.592,58 km².

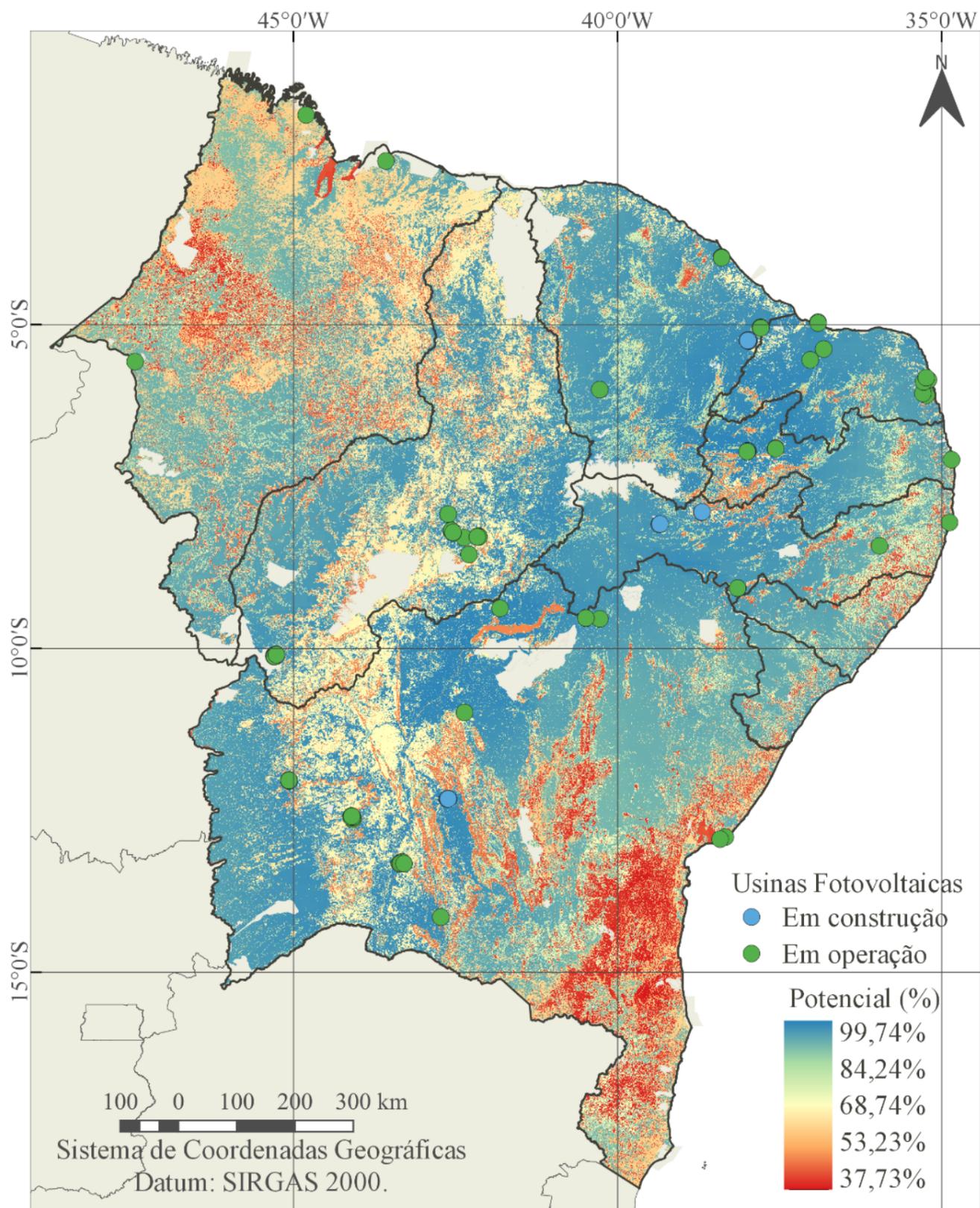


Figura 17: Mapa de potencial biofísico para geração de energia fotovoltaica no Nordeste do Brasil.

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Os resultados apresentados na Figura 16 decorrem do fato de que os elementos analisados no estudo mostraram condições favoráveis para a geração de energia fotovoltaica, isto é: relevo predominantemente plano ou suavemente ondulado

(declividade entre 0% e 5%); elevada disponibilidade de irradiação solar; e condições de cobertura do solo favoráveis, dada a baixa atividade fotossintética apresentada e ocorrência de solo exposto.

Estudos desenvolvidos na região leste do Marrocos mostraram que os locais altamente adequados representam aproximadamente 19% de toda a superfície, o que permite afirmar que é uma área com configurações compatíveis com a produção de energia fotovoltaica (MERROUNI *et al.*, 2018). Já Al-Sammari *et al.* (2021), ao estudarem as condições para instalação de usinas fotovoltaicas na Arábia Saudita, verificaram que o percentual máximo de compatibilidade observado foi de até 87%, uma vez que esta localidade apresenta condições climáticas que restringem o ótimo desempenho das usinas, como a ocorrência de tempestades de areia.

Os resultados aqui apresentados revelaram que a região Nordeste possui condições adequadas para a atividade de geração de energia solar em uma grande porção do seu território. Tal aspecto deriva do fato desta região apresentar relevo majoritariamente plano, pouca densidade vegetal e elevada incidência de irradiação solar.

Quanto à relação estabelecida entre as variáveis que constituem o potencial biofísico proposto e os grupos de impactos ambientais (Figura 18), percebe-se que incide majoritariamente sobre o meio físico uma vez que aborda as classes de cobertura do solo; o relevo, que por sua vez configura um aspecto da geomorfologia; e o clima, abrangido pela IGH.

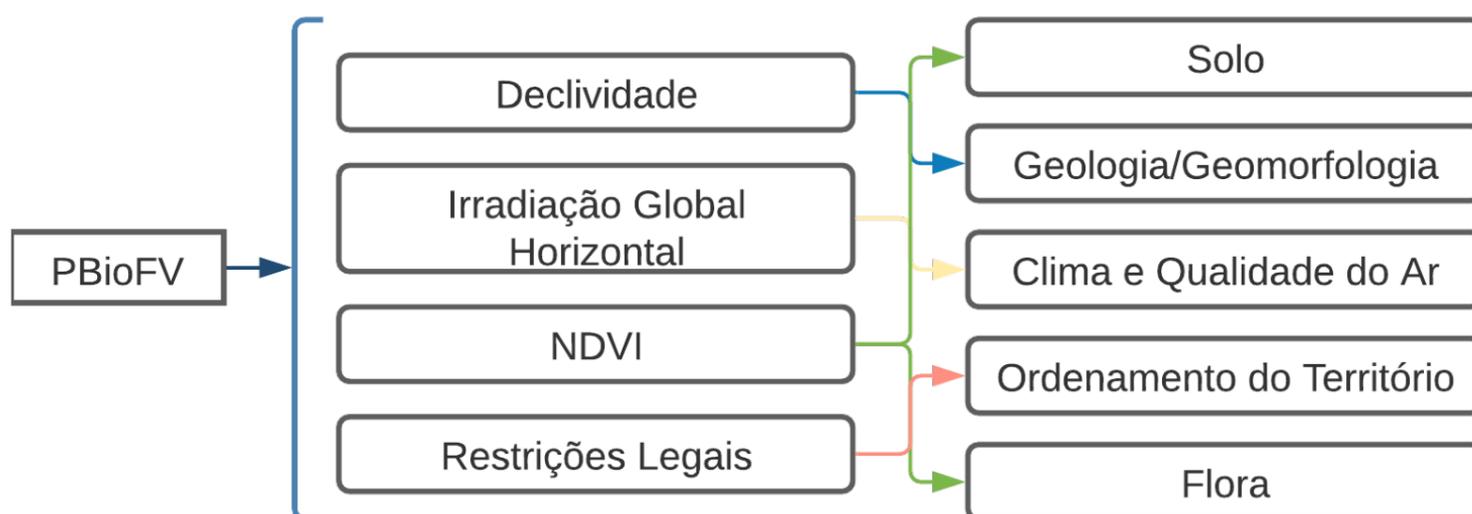


Figura 18: Interação entre os componentes do PBioFV e os subgrupos de impactos.
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Todavia, também é notória a relação com o meio biótico, especificamente com a flora, por se discutir as condições de vigor vegetal a partir da intensidade da atividade

fotosintética; e com o meio socioeconômico, tendo em vista a adoção de critérios baseados no SNUC e no Código Florestal, referentes ao ordenamento territorial.

Ao analisar as condições das usinas fotovoltaicas em operação e construção na região (Figura 19), verifica-se que, em sua maioria, estão situadas em áreas com elevado potencial biofísico, fato que permite a otimização do uso da energia solar e a minimização dos impactos ambientais ao longo do planejamento, implantação, operação e desativação dos empreendimentos.

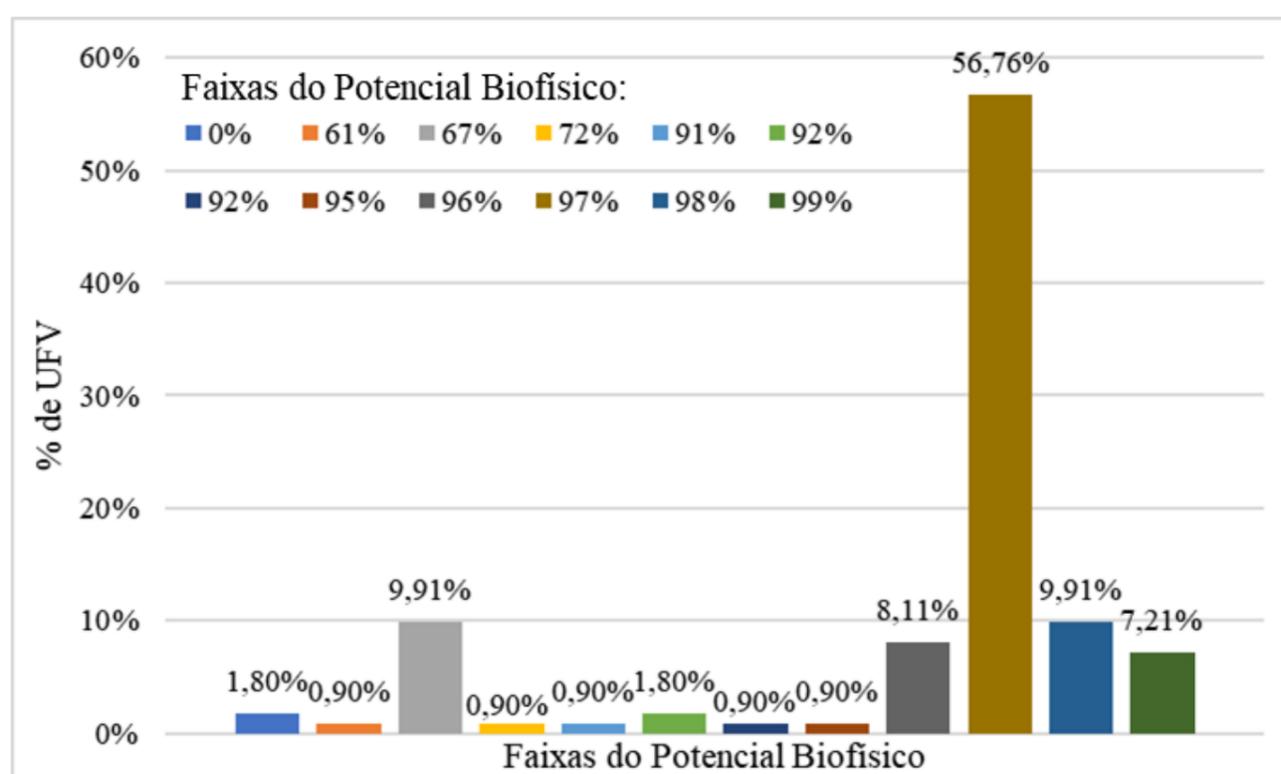


Figura 19: Potencial biofísico das áreas ocupadas pelas usinas fotovoltaicas em operação e construção no Nordeste do Brasil.

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Conforme apresentado, somente 1,8% (02) das usinas estão situadas em áreas com 0% de potencial, consideradas impróprias, por se tratar de unidades de conservação. Nota-se ainda que 8,11% (09) estão localizadas em zonas com potencial de 96%, a maioria, isto é, 56,76% (63) estão em áreas com 97% aptidão, 9,91% (11) em áreas com 98% de potencial e 7,21% (08) em localidades onde esse índice alcança os 99%.

CAPÍTULO 5
CONSIDERAÇÕES FINAIS

O crescimento exponencial da geração de eletricidade fotovoltaica, integrada ao meio ambiente – que compreende a natureza e a sociedade –, é fundamental para o desenvolvimento sustentável especialmente quando consideramos o papel da energia renovável na transição para uma economia mais inclusiva do ponto de vista social e eficiente na sua relação com o meio ambiente, bem como nas soluções de questões globais fundamentais como segurança energética, pobreza e mudança climática.

Nesse contexto, a AIA exerce papel fundamental na instalação de novos empreendimentos de geração de eletricidade fotovoltaica, visto que a partir da correta identificação das possíveis alterações benéficas e adversas, incluindo aquelas de caráter cumulativo e sinérgico, permite contribuir para o processo de tomada de decisão por determinar a viabilidade ambiental dos empreendimentos e indicar possíveis caminhos para mitigação dos impactos negativos.

Os dados históricos demonstraram que os componentes ambientais mais impactados negativamente são a fauna, o solo, a saúde e a segurança da população e dos trabalhadores. Na opinião dos especialistas que elaboraram os 41 estudos ambientais analisados, as referidas UFVs ocasionaram mais impactos no componente saúde e segurança da população do que no componente emprego. Isso evidencia a pressão sobre os serviços públicos e no cotidiano dos habitantes locais, devido à população flutuante trazida por empreendimentos de grande porte.

Este trabalho demonstrou que a quantificação dos impactos ambientais causados pela geração de eletricidade fotovoltaica pode ser utilizada para avaliar o benefício da atividade. Pode também permitir a identificação dos impactos negativos de maior relevância, baseado na opinião dos profissionais que elaboram os estudos ambientais e nas aprovações conferidas pelos órgãos ambientais.

Ainda foi possível identificar que alguns impactos referenciados na literatura internacional não foram previstos nas avaliações de impacto ambiental analisadas, como por exemplo, o consumo de água utilizado para implantação desse tipo de empreendimento e a dispersão de poluentes atmosféricos ao intervir em solos que outrora foram utilizados na agricultura intensiva. A ausência dessas previsões pode comprometer a tomada de decisão por parte dos órgãos reguladores e licenciadores desses empreendimentos.

A estruturação de uma base de dados contendo os impactos ambientais na atividade de geração de eletricidade fotovoltaica pode auxiliar também as empresas que pretendem implantar UFVs, fornecendo uma visão ampla de quais impactos foram

prognosticados para determinada região, e, permitindo a condução dos estudos ambientais, econômicos e sociais de forma mais assertiva.

Quanto à viabilidade de geração de energia fotovoltaica, a partir dos componentes biofísicos, constatou-se que a região Nordeste possui um elevado potencial em quase todo o território dadas as boas condições de relevo, baixa densidade vegetal e abundância de irradiação solar.

Com vistas ao desenvolvimento sustentável desta região, é muito pertinente promover a identificação de áreas adequadas para o desenvolvimento da geração da energia fotovoltaica, permitindo o planejamento da transmissão. Pode ainda fornecer subsídios para a elaboração de planos, programas e políticas públicas; ampliando as certezas do mercado da energia solar e permitindo a identificação de áreas ambientalmente sensíveis, de modo a consorciar à geração de energia fotovoltaica à minimização de impactos indesejados

Embora o método proposto possa auxiliar na seleção de locais para instalação de empreendimentos de geração de energia fotovoltaica, há fragilidades que podem ser melhoradas futuramente. Neste sentido, para trabalhos futuros, sugere-se incrementar o índice a partir da inserção de elementos antrópicos, como as redes de transmissão e as vias de tráfego; e adotar o uso de métodos de análise multicritério.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Sistema de Informações de Geração da ANEEL**. 2020. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/siga>. Acesso em: 02 out. 2020.

AKKAS, O. P.; ERTEN, M. Y.; CAM, E.; INANC, N. Optimal site selection for a solar power plant in the Central Anatolian Region of Turkey. **International Journal of Photoenergy**, v. 2017, 2017.

ALMEIDA, F. S.; GARRIDO, F. S. R. G.; ALMEIDA, A. A. Avaliação de impactos ambientais: uma introdução ao tema com ênfase na atuação do Gestor Ambiental. **Diversidade e Gestão**, v. 1, n. 1, p. 70-87, 2017.

AL-SHAMMARI, S.; KO, W.; AL AMMAR, E. A.; ALOTAIBI, M. A.; CHOI, H. J. Optimal Decision-Making in Photovoltaic System Selection in Saudi Arabia. **Energies**, v. 14, n. 2, p. 357, 2021.

AMAN, M. M.; SOLANGI, K. H.; HOSSAIN, M. S.; BADARUDIN, A.; JASMON, G. B.; MOKHLIS, H.; KAZI, S. N. A review of Safety, Health and Environmental (SHE) issues of solar energy system. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 41, p. 1190-1204, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA (ABSOLAR). **Panorama da energia solar fotovoltaica no Brasil e no mundo**. 2021. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 09 mai. 2021.

AZEVÊDO, V.; CANDEIAS, A.; TIBA, C. Location Study of Solar Thermal Power Plant in the State of Pernambuco Using Geoprocessing Technologies and Multiple-Criteria Analysis. **Energies**, [S.L.], v. 10, n. 7, p. 1042, 20 jul. 2017.

BALDISERA, R. S. Influência das variáveis climáticas-declinação solar, fotoperíodo e irradiação no topo da atmosfera, em regiões agricultáveis do Brasil. **Revista de ciências agroambientais**, v. 15, n. 2, p. 108-115, 2018.

BANDEIRA, T. V.; CRUZ, M. L. B. Estudo da cobertura vegetal do município de Guaiuba/CE com base na utilização dos índices de vegetação SAVI e NDVI. **Geosul**, v. 36, n. 78, p. 410-433, 2021.

BERMANN, C. Crise ambiental e as energias renováveis. **Ciência e Cultura**, v. 60, n. 3, p. 20-29, 2008.

BRADSHAW, A.; JANNUZZI, G. M. Governing energy transitions and regional economic development: Evidence from three Brazilian states. **Energy Policy**, v. 126, p. 1-11, 2019.

BRAGA, B.; HESPANHOL, I.; CONEJO, J. G. L.; MIERZWA, J. C.; BARROS, M. T. L.; SPENCER, M.; EIGER, S. **Introdução à Engenharia Ambiental: o desafio do desenvolvimento sustentável**. 2 Ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Constituicao/Constituicao.htm. Acesso em: 23 jan. 2021.

BRASIL. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm. Acesso em: 23 jan. 2021.

BRASIL. **Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L6938.htm. Acesso em: 23 jan. 2021.

BRASIL. **Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000**. Regulamenta o art. 225, § 1º, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19985.htm. Acesso em: 23 jan. 2021.

BURSZTYN, M. Energia solar e desenvolvimento sustentável no Semiárido: o desafio da integração de políticas públicas. **Estudos Avançados**, v. 34, p. 167-186, 2020.

CALDAS, R. M. **Gerenciamento dos aspectos e impactos ambientais**. 2 Ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2019.

CAMERON, D. R.; COHEN, B. S.; MORRISON, S. A. An approach to enhance the conservation-compatibility of solar energy development. **PLoS ONE**, v. 7, n. 6, 2012.

CARDOSO, D. S.; LOCATELLI, P. S.; RAMALHO, W.; ASGARY, N. Geração distribuída de energia solar fotovoltaica: impactos da proposta de nova regulamentação pela ANEEL na atratividade do investimento. **Revista de Administração da UFSM**, v. 14, p. 423-442, 2021.

CARPIO, L. G. T. Efficient spatial allocation of solar photovoltaic electric energy generation in different regions of Brazil: a portfolio approach. **Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy**, p. 1-16, 2021.

CHOI, Y.; SUH, J.; KIM, S. GIS-based solar radiation mapping, site evaluation, and potential assessment: A review. **Applied Sciences**, v. 9, n. 9, p. 1960, 2019.

COLAK, H. E.; MEMISOGLU, T.; GERCEK, Y. Optimal site selection for solar photovoltaic (PV) power plants using GIS and AHP: A case study of Malatya Province, Turkey. **Renewable energy**, v. 149, p. 565-576, 2020.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução nº 01 de 23 de janeiro de 1986**. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/res/res86/res0186.html>. Acesso em: 23 jan. 2021.

DHAR, A.; NAETHA, M. A.; JENNINGS, P. D.; EL-DIN, M. G. Perspectives on environmental impacts and a land reclamation strategy for solar and wind energy systems. **Science of The Total Environment**, v. 718, p. 134602, 2020.

DOLJAK, D.; STANOJEVIĆ, G. Evaluation of natural conditions for site selection of ground-mounted photovoltaic power plants in Serbia. **Energy**, v. 127, p. 291-300, 2017.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5 ed. Brasília/DF: 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Matriz Energética e Elétrica**. 2018. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 12 jan. 2021.

ENVIRONMENTAL RESOURCES LTD. 1984. Prediction in environmental impact assessment. E.I.A. **The Hague: Ministries of Housing, Physical Planning and Environment and of Agriculture and Fisheries**. Publication series n. 17, 1984.

FANG, H.; LI, J.; SONG, W. Sustainable site selection for photovoltaic power plant: An integrated approach based on prospect theory. **Energy Conversion and Management**, v. 174, p. 755-768, 2018.

FERRAZ, R. T.; CODICEIRA, A. Diversificação da Matriz de Energias Renováveis no Brasil: O Desenvolvimento das Novas Fontes de 2010 a 2016. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, v. 2, n. 4, 2017.

FERREIRA, M. B. M.; SALLES, A. O. T. Política ambiental brasileira: análise histórico-institucionalista das principais abordagens estratégicas. **Revista de Economia**, v. 42, n. 2, 2017.

FIELD, J. P.; BELNAP, J.; BRESHEARS, D. D.; NEFF, J. C.; OKIN, G. S.; WHICKER, J.J.; REYNOLDS, R. L. The ecology of dust. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 8, n. 8, p. 423–430, 2010.

FTHENAKIS, V.; KIM, H. C. Life-cycle uses of water in U.S. electricity generation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 7, p. 2039–2048, 2010.

GARCIA, K. C. **Avaliação de Impactos Ambientais**. Curitiba: InterSaberes, 2014.

GARNI, H. Z.; AWASTHI, A. Solar PV power plant site selection using a GIS-AHP based approach with application in Saudi Arabia. **Applied energy**, v. 206, p. 1225-1240, 2017.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energias renováveis: um futuro sustentável. **Revista USP**, n. 72, p. 6-15, 2007.

GUAITA-PRADAS, I.; MARQUES-PEREZ, I.; GALLEGU, A.; SEGURA, B. Analyzing territory for the sustainable development of solar photovoltaic power using GIS databases. **Environmental monitoring and assessment**, v. 191, n. 12, p. 1-17, 2019.

GUERIN, T. A case study identifying and mitigating the environmental and community impacts from construction of a utility-scale solar photovoltaic power plant in eastern Australia. **Solar Energy**, v. 146, p. 94-104, 2017.

GUILLER, C.; AFFRE, L.; DESCHAMPS-COTTIN, M.; GESLIN, B.; KALDONSKI, N.; TATONI, T. Impacts of solar energy on butterfly communities in mediterranean agroecosystems. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, v. 36, n. 6, p. 1817-1823, 2017.

HERNANDEZ, R. R.; HOFFACKER, M. K.; FIELD, C. B. Land-use efficiency of big solar. **Environmental science & technology**, v. 48, n. 2, p. 1315-1323, 2014.

HERNANDEZ, R. R.; HOFFACKER, M. K.; MURPHY-MARISCAL, M. L.; WU, G. C.; ALLEN, M. F. Solar energy development impacts on land cover change and protected areas. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 112, n. 44, p. 13579-13584, 2015.

HO, C. K. Review of avian mortality studies at concentrating solar power plants. **AIP Conference Proceedings**, 2016. p. 070017.

HOSENUZZAMAN, M.; RAHIM, N. A.; SELVARAJ, J.; HASANUZZAMAN, M.; MALEK, A. A.; NAHAR, A. Global prospects, progress, policies, and environmental impact of solar photovoltaic power generation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 41, p. 284-297, 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Estimativas da População. 2020.** Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html?=&t=o-que-e>. Acesso em: 09 mai. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Organização do Território.** 2017. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio.html>. Acesso em: 09 mai. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). **Avaliação de impacto ambiental: caminhos para o fortalecimento do Licenciamento Ambiental Federal.** Brasília: Ibama, 2016.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBio). **Mapa Temático e Dados Geoestatísticos das Unidades de Conservação Federais.** 2020. Disponível em: <https://www.icmbio.gov.br/portal/geoprocessamentos/51-menu-servicos/4004-downloads-mapa-tematico-e-dados-geoestatisticos-das-uc-s>. Acesso em: 21 set. 2021.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Atlas brasileiro de energia solar.** 2.ed. São José dos Campos: INPE, 2017.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Summary for Policy Makers**. 2011. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/srccl/chapter/summary-for-policymakers/>. Acesso em: 23 jan. 2021.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Summary for Policy Makers**. 2018. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15_SPM_version_report_LR.pdf. Acesso em: 23 jan. 2021.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Renewables 2020: Analysis and Forecasts to 2025**. 2020. Disponível em: https://iea.blob.core.windows.net/assets/1a24f1fe-c971-4c25-964a-57d0f31eb97b/Renewables_2020-PDF.pdf. Acesso em: 23 jan. 2021.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Future of solar photovoltaic: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects**. Abu Dhabi: IRENA, 2019. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2019/Nov/Future-of-Solar-Photovoltaic>. Acesso em: 09 mai. 2021.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Renewable Capacity Statistics 2021**. Abu Dhabi: IRENA, 2020. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2021/March/Renewable-Capacity-Statistics-2021>. Acesso em 20 de jul. de 2021.

IZEIROSKI, S.; IDRIZI, B.; LUTOVSKA, M.; KABASHI, I. Gis-based multi criteria analysis of site suitability for exploitation of renewable energy resources. In: **Proc., 7th Int. Conf. on Cartography and GIS**. 2018. p. 653-665.

JONG, P.; BARRETO, T. B.; TANAJURA, C. A.; KOULOUKOU, D.; OLIVEIRA-ESQUERRE, K. P.; KIPERSTOK, A.; TORRES, E. A. Estimating the impact of climate change on wind and solar energy in Brazil using a South American regional climate model. **Renewable Energy**, [S.L.], v. 141, p. 390-401, 2019.

KEMERICH, P. D. C.; FLORES, C. E. B.; BORBA, W. F.; SILVEIRA, R. B.; FRANÇA, J. R.; LEVANDOSKI, N. Paradigmas da energia solar no Brasil e no mundo. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 20, n. 1, p. 241-247, 2016.

LANA, L. T. C.; ALMEIDA, E.; DIAS, F. C. L. S.; ROSA, A. C.; SANTO, O. C. E.; SACRAMENTO, T. C. B.; BRAZ, K. T. M. Energia solar fotovoltaica: revisão bibliográfica. **Engenharias online**, Belo Horizonte, v.1, n.2, 2015.

LI, C.; XU, C.; LI, X. A multi-criteria decision-making framework for site selection of distributed PV power stations along high-speed railway. **Journal of Cleaner Production**, v. 277, p. 124086, 2020.

LIU, J.; XU, F.; LIN, S. Site selection of photovoltaic power plants in a value chain based on grey cumulative prospect theory for sustainability: A case study in Northwest China. **Journal of Cleaner Production**, v. 148, p. 386-397, 2017.

LOVICH, J. E.; ENNEN, J. R. Wildlife Conservation and Solar Energy Development in the Desert Southwest, United States. **Bio Science**, v. 61, n. 12, p. 982–992, 2011.

MARINOSKI, D. L.; SALAMONI, I. T.; RÜTHER, R. Pré-dimensionamento de sistema solar fotovoltaico: estudo de caso do edifício sede do CREA-SC. **I Conferência Latino-Americana De Construção Sustentável X Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. São Paulo. ANTAC**, 2004.

MARTINS, Fernando Ramos; PEREIRA, Enio Bueno; ECHER, Mariza Pereira de Souza. Levantamento dos recursos de energia solar no Brasil com o emprego de satélite geostacionário: o Projeto Swera. **Revista brasileira de Ensino de Física**, v. 26, n. 2, p. 145-159, 2004.

MAYER, F. D.; CREMONESE, G.; GALLON, R.; SERAFINI, S. T.; HOFFMANN, R.; MICHELS, A. Aproveitamento térmico de energia solar em substituição à queima de óleo combustível no aquecimento de água em piscinas. **Revista Liberato**, v. 8, n. 9, p. 17-22, 2007.

MERROUNI, A. A.; ELALAOU, F. E.; MEZRHAB, A.; MEZRHAB, A.; GHENNIQUI, A. Large scale PV sites selection by combining GIS and Analytical Hierarchy Process. Case study: Eastern Morocco. **Renewable energy**, v. 119, p. 863-873, 2018.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Resenha Energética Brasileira**. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/ResenhaEnergicaExercicio2020final.pdf>. Acesso em: 15 ago 2021.

MISHRA, P.; BEHERA, B. Socio-economic and environmental implications of solar electrification: Experience of rural Odisha. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 56, p. 953-964, 2016.

MOORE-O'LEARY, K. A.; HERNANDEZ, R. R.; JOHNSTON, D. S.; ABELLA, S. R.; TANNER, K. E.; SWANSON, A. C.; LOVICH, J. E. Sustainability of utility-scale solar energy—critical ecological concepts. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 15, n. 7, p. 385-394, 2017.

MUNSON, S. M.; BELNAP, J.; OKIN, G. S. Responses of wind erosion to climate-induced vegetation changes on the Colorado Plateau. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 108, n. 10, p. 3854–3859, 2011.

NEKOLA, J. C. The impact of a utility corridor on terrestrial gastropod biodiversity. **Biodiversity and Conservation**, v. 21, n. 3, p. 781–795, 2012.

PACHECO, F. Energias Renováveis: breves conceitos. **Conjuntura e Planejamento**, n. 149, p. 4-11, 2006.

PAINTER, T. H.; DEEMS, J. S.; BELNAP, J.; HAMLET, A. F.; LANDRY, C. C.; UDALL, B. Response of Colorado river runoff to dust radiative forcing in snow.

Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, v. 107, n. 40, p. 17125–17130, 2010.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2.ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 80p.

PINHEIRO JÚNIOR, M. A. P.; BARBOSA, G. F.; NASCIMENTO, A. C.; MARQUES, W. N. S.; VASCONCELOS, S. M. Sistema híbrido de energia: funcionamento e utilização residencial. **Projectus**, v. 1, n. 2, p. 104-109, 2017.

PINHEIRO, H. H. C.; SILVA, N. F.; BRANCO, D. A. C.; PEREIRA, M. C. Photovoltaic Solar Systems in Multi-Headquarter Institutions: a technical implementation in northeastern brazil. **Energies**, v. 13, n. 10, p. 2659, 2020.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL, 2014.

PINTO, A. C.F.; SCHEMMER, C. Políticas públicas brasileiras de isenções fiscais para produtos de energia renovável como forma de prevenção do ambiente natural. **Seminário Internacional Demandas Sociais e Políticas Públicas na Sociedade Contemporânea**, 2018.

POTT, C. M.; ESTRELA, C. C. Histórico ambiental: desastres ambientais e o despertar de um novo pensamento. **Estudos avançados**, v. 31, n. 89, p. 271-283, 2017.

RABAIA, M. K. H.; ABDELKAREEM, M. A.; SAYED, E. T.; ELSAID, K.; CHAE, K.; WILBERFORCE, T.; OLABI, A. G. Environmental impacts of solar energy systems: A review. **Science of The Total Environment**, v. 754, p. 141989, 2021.

RAVI, S.; D'ODORICO, P.; BRESHEARS, D. D.; FIELD, J. P.; GOUDIE, A. S.; HUXMAN, T. E.; LI, J.; OKIN, G. S.; SWAP, R. J.; THOMAS, A. D. Aeolian processes and the biosphere. **Reviews Of Geophysics**, [S.L.], v. 49, n. 3, p. 1-45, 3 ago. 2011.

REDISKE, G.; SILUK, J. C. M.; GASTALDO, N. G.; RIGO, P. D.; ROSA, C. B. Determinant factors in site selection for photovoltaic projects: a systematic review. **International Journal Of Energy Research**, [S.L.], v. 43, n. 5, p. 1689-1701, 2019.

ROCHA, A. P. B.; DANTAS, E. M.; MORAIS, I. R. D.; OLIVEIRA, M. S. **Geografia do Nordeste**. 2 Ed. Natal: EDUFRN, 2010.

ROSA, A. R. O.; GASPARIN, F. P. Panorama da energia solar fotovoltaica no Brasil. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v. 7, n. 2, p. 140-147, 2016.

SALAMANCA-ÁVILA, S. Proposta de design para um sistema de energia solar fotovoltaica. Caso de aplicação na cidade de Bogotá. **Revista científica**, n. 30, p. 263-277, 2017.

SÁNCHEZ, L. E. **Avaliação de impactos ambientais: conceitos e métodos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

SANTOS, G. V. Breves considerações sobre a problemática ambiental e o uso do carvão mineral na matriz energética brasileira. **Revista Grifos**, v. 23, n. 36/37, p. 15-27, 2016.

SHORABEH, S. N.; FIROZJAEI, M. K.; NEMATOLLAHI, O.; FIROZJAEI, H. K.; JELOKHANI-NIARAKI, M. A risk-based multi-criteria spatial decision analysis for solar power plant site selection in different climates: A case study in Iran. **Renewable Energy**, v. 143, p. 958-973, 2019.

TAWALBEH, M.; AL-OTHMAN, A.; KAFIAH, F.; ABDELSALAM, E.; ALMOMANI, F.; ALKASRAWI, M. Environmental impacts of solar photovoltaic systems: A critical review of recent progress and future outlook. **Science of The Total Environment**, p. 143528, 2021.

TORRES, D. G. B.; LUCA, B. H.; MALACARNE, J. A.; SOUSA, J.; CASAROLLI, D.; SILVA, E. D.; GUERRA, T. Células fotovoltaicas: Desenvolvimento e as três gerações. **Revista Técnico-Científica**, n. 17, 2019.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **MOD13Q1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V006**. NASA EOSDIS Land Processes DAAC. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13Q1.006>. Acesso em: 20 mai. 2021.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Non-Void Filled**. 2018. Disponível em: https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm-non?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects. Acesso em: 20 mai. 2021.

VANCLAY, F.; ESTEVES, A. M.; AUCAMP, I.; FRANKS, D. M. Social Impact Assessment: Guidance for assessing and managing the social impacts of projects. Fargo, ND: **International Association for Impact Assessment**, 2015.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Climatologia e Meteorologia**. Recife: EDUFPE, 2006.

VELOSO, C. K. P. R.; TEIXEIRA, W. C.; SILVA JÚNIOR, D. C. Energia Fotovoltaica: legislação e incentivos pelo mundo e como impactam o Brasil. **Caderno de Estudos da Engenharia Elétrica**, v. 3, n. 1, 2021.

VRÎNCEANU, A.; GRIGORESCU, I.; DUMITRAȘCU, M.; MOCANU, I.; DUMITRICĂ, C.; MICU, D.; MITRICĂ, B. Impacts of photovoltaic farms on the environment in the Romanian plain. **Energies**, v. 12, n. 13, p. 2533, 2019.

WALSTON JR, L. J.; ROLLINS, K. E.; LAGORY, K. E.; SMITH, K. P.; MEYERS, S. A. A preliminary assessment of avian mortality at utility-scale solar energy facilities in the United States. **Renewable Energy**, v. 92, p. 405-414, 2016.

WANG, Z.; FAN, W. Economic and environmental impacts of photovoltaic power with the declining subsidy rate in China. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 87, p. 106535, 2021.

YOUSEFI, H.; HAFEZNIA, H.; YOUSEFI-SAHZABI, A. Spatial site selection for solar power plants using a gis-based boolean-fuzzy logic model: A case study of Markazi Province, Iran. **Energies**, v. 11, n. 7, p. 1648, 2018.

ZAMBRANO-ASANZA, S.; QUIROS-TORTOS, J.; FRANCO, John F. Optimal site selection for photovoltaic power plants using a GIS-based multi-criteria decision making and spatial overlay with electric load. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 143, p. 110853, 2021.