

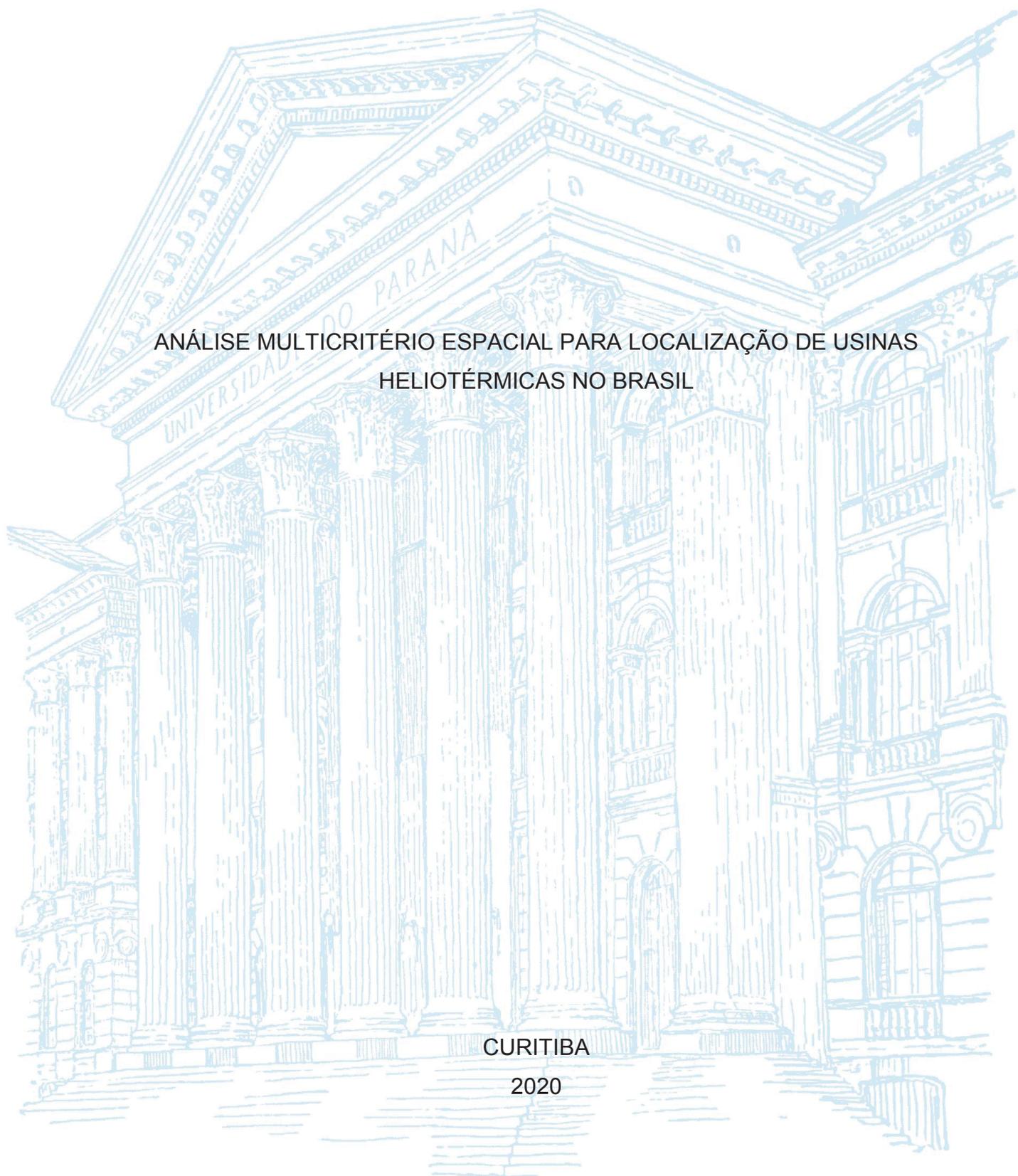
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

EDUARDO CHIARANI

ANÁLISE MULTICRITÉRIO ESPACIAL PARA LOCALIZAÇÃO DE USINAS  
HELIOTÉRMICAS NO BRASIL

CURITIBA

2020



EDUARDO CHIARANI

ANÁLISE MULTICRITÉRIO ESPACIAL PARA LOCALIZAÇÃO DE USINAS  
HELIOTÉRMICAS NO BRASIL

Dissertação apresentada como requisito à obtenção do grau de Mestre em Ciências Geodésicas no programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Alzir Felipe Buffara Antunes

CURITIBA

2020

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR  
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

C532a

Chiarani, Eduardo

Análise multicritério espacial para localização de usinas heliotérmicas no Brasil [recurso eletrônico] / Eduardo Chiarani. – Curitiba, 2020.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, 2020.

Orientador: Alzir Felipe Buffara Antunes.

1. Usinas heliotérmicas. 2. Energia solar. 3. Dados geoespaciais. I. Universidade Federal do Paraná. II. Antunes, Alzir Felipe Buffara. III. Título.

CDD: 621.47

Bibliotecária: Vanusa Maciel CRB- 9/1928



## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS GEODÉSICAS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **EDUARDO CHIARANI** intitulada: **ANÁLISE MULTICRITÉRIO ESPACIAL DA LOCALIZAÇÃO DE USINAS HELIOTÉRMICAS NO BRASIL**, sob orientação do Prof. Dr. ALZIR FELIPPE BUFFARA ANTUNES, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 31 de Janeiro de 2020.

ALZIR FELIPPE BUFFARA ANTUNES

Presidente da Banca Examinadora (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

LUCIENE STAMATO DELAZARI

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

CHRISTEL LINGNAU

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

## **AGRADECIMENTOS**

Para todas as pessoas e acontecimentos que direta ou indiretamente contribuíram ao desenvolvimento deste trabalho e a conclusão deste período de mestrado.

Em especial à minha família, Nelso, Rose, Gabi, Nico e Laica, que me ensinam e dão forças para crescer pessoalmente e profissionalmente ao longo de minha vida.

À minha namorada, Camila, que com carinho, me ajudou a encarar os desafios e a superá-los.

Aos engenheiros da 'mansão', meus amigos com quem dividi teto, aflições e felicidades cotidianas.

Aos colegas de trabalho do LACTEC, em especial a Danielle, pela colaboração nos desafios profissionais e por vezes pessoais. E aos demais amigos e conhecidos que me incentivaram ou desafiaram a trilhar este caminho.

Ao LACTEC junto a CESP, pelo fomento financeiro disposto através de bolsa de mestrado, e também pelos profissionais e estruturas disponibilizadas a este projeto.

Por fim, à Universidade Federal do Paraná e a todos os docentes que despertam os questionamentos iniciais que promovem e fomentam o desenvolvimento científico e tecnológico da humanidade. Em especial ao Professor Alzir, pela orientação neste projeto e principalmente pela contribuição à comunidade ao longo destes anos por meio da vida acadêmica.

*“Nem tudo que se enfrenta pode ser  
modificado, mas nada pode ser modificado até  
que seja enfrentado” James Baldwin*

*“A rebeldia nem sempre é premiada, mas a  
obediência é castigada invariavelmente”  
Roberto Mangabeira Unger*

## RESUMO

As fontes de energia renováveis são a principal fonte de geração de energia elétrica no Brasil. No entanto, cerca de 91% concentram-se em fontes hidráulicas, que em períodos de seca podem comprometer a geração de energia resultando na compensação com combustíveis fósseis. Como alternativa para diversificação da matriz renovável, as usinas heliotérmicas são uma fonte emergente. Este estudo, como parte do P&D Estratégico da ANEEL (PD-00061-0050/2016), tem como objetivo fomentar o desenvolvimento destas tecnologias no Brasil, determinando regiões viáveis à sua implantação através de análise multicritério espacial. A metodologia foi composta pela análise das precondições que afetam a instalação e funcionamento de usinas heliotérmicas, sendo ponderadas por profissionais especializados na área, através do processo de análise hierárquica (AHP). Cada precondição foi analisada espacialmente através de dados geoespaciais referentes às regiões do Brasil, modelados em sistemas de informação geográfica (SIG). Como resultado, as regiões foram mapeadas conforme índices de viabilidade, obtendo-se índices favoráveis em grande parte das regiões nordeste, sudeste e centro-oeste, com destaque ao oeste do estado da Bahia, que apresentou os maiores índices. Constatou-se que os resultados são diretamente relacionados com a irradiação solar direta normal (DNI), e que a metodologia é um instrumento viável de auxílio à escolha de regiões para implantação de usinas heliotérmicas no Brasil.

Palavras-chave: Energia solar concentrada, AHP, AHP baseado em SIG, Álgebra de mapas, Processamento de dados geográficos.

## **ABSTRACT**

The renewable energy sources are the main electricity generation source in Brazil. However, about 91% relies on water sources, which in dry seasons could compromise the power generation resulting in the use of fossil fuels as compensation. An alternative to diversify the renewable energy matrix is the Concentrated Solar Power (CSP). This study, as part of ANEEL Strategic R&D (PD-00061-0050/2016), aims to foment the technology in Brazil sitting viable regions to deploy it by spatial multicriteria analysis. The methodology analyzed the preconditions that affect the installation and operation of a CSP plant, which were weighted by expert professionals through the Analytic Hierarchy Process (AHP). Each precondition was spatially studied through geospatial data referring to the Brazilian regions and modeled on Geographic Information Systems (GIS). As a result, the regions were mapped according to viability indices, obtaining positive ones in most of northeast, southeast and midwest of Brazil, especially the west of the state of Bahia, which had the highest ones. It was found that the results are directly related to the normal direct solar radiation index (DNI) and that the methodology is an aid to choose regions for implantation of CSP plants in Brazil.

Key words: Concentrated solar power (CSP), AHP, GIS based AHP, Map algebra, Geographic data processing.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: OFERTA DE ENERGIA NO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL (SIN)	15
.....	.....
FIGURA 2: PRINCIPAIS TECNOLOGIAS CSP	19
FIGURA 3: ESQUEMA BÁSICO DE PLANTA DE GERAÇÃO HELIOTÉRMICA	20
FIGURA 4: CONJUNTO DE ESPELHOS USINA ANDASOL 1 (50MW, ESPANHA)	21
FIGURA 5: CADEIA DE VALOR DE PLANEJAMENTO DE USINAS HELIOTÉRMICAS	21
.....	.....
FIGURA 6: METODOLOGIA DE INTEGRAÇÃO DA ANÁLISE ESPACIAL COM MCDA-AHP	23
.....	.....
FIGURA 7: HIERARQUIZAÇÃO DE OBJETIVOS, CRITÉRIOS E ALTERNATIVAS AHP	24
.....	.....
FIGURA 8: ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA ALEATÓRIA (IA)	26
FIGURA 9: COMBINAÇÃO DE CAMADAS DE INFORMAÇÕES	28
FIGURA 10: DETERMINAÇÃO DO MELHOR CORREDOR PARA TRAÇADO DA RODOVIA	29
.....	.....
FIGURA 11: APLICAÇÃO DO MODELO CLP COM 3 CONJUNTO DE CAMADAS	30
FIGURA 12: GRÁFICO DA FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA SIGMOIDAL DECRESCENTE	31
.....	.....
FIGURA 13: REGIÕES DE ESTUDO	36
FIGURA 14: ESQUEMATIZAÇÃO DO ÍNDICE DE IRRADIAÇÃO SOLAR DO SOLARGIS	37
.....	.....
FIGURA 15: ÍNDICE DE IRRADIAÇÃO SOLAR DIRETA PARA O BRASIL	38
FIGURA 16: FLUXOGRAMA DE ETAPAS DA METODOLOGIA	43
FIGURA 17: HIERARQUIZAÇÃO AHP	45
FIGURA 18: FORMULÁRIO (INDICAÇÕES E INSTRUÇÕES DE PREENCHIMENTO – PARTE 1)	46
.....	.....
FIGURA 19: FORMULÁRIO (INDICAÇÕES E INSTRUÇÕES DE PREENCHIMENTO – PARTE 2)	47
.....	.....
FIGURA 20: FORMULÁRIO (IDENTIFICAÇÃO DO PROFISSIONAL)	47
FIGURA 21: FORMULÁRIO (QUESTIONÁRIO 1)	48
FIGURA 22: FORMULÁRIO (QUESTIONÁRIO 2)	48
FIGURA 23: FORMULÁRIO (QUESTIONÁRIO 3)	49

FIGURA 24: FORMULÁRIO (QUESTIONÁRIO 4) .....	50
FIGURA 25: RECLASSIFICAÇÃO DOS DADOS PELA DISCRETIZAÇÃO E LÓGICA DIFUSA.....	55
FIGURA 26: PROCESSAMENTO GEOGRÁFICO DA CAMADA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO .....	58
FIGURA 27: REPRESENTAÇÃO DAS CAMADAS PADRONIZADAS.....	61
FIGURA 28: AMOSTRAGEM DE VALIDAÇÃO (EM AMARELO) .....	64
FIGURA 29: VALIDAÇÃO (AMOSTRA 1 – ERNESTINA/SP) .....	65
FIGURA 30: COMPETÊNCIAS GERAIS DAS EMPRESAS COLABORADORAS NO PROJETO .....	68
FIGURA 31: GRÁFICO DAS ÁREAS DE ESPECIALIZAÇÃO DOS PROFISSIONAIS CONSULTADOS .....	69
FIGURA 32: GRÁFICO PONDERAÇÃO DOS CRITÉRIOS (QUESTIONÁRIO 4) ....	71
FIGURA 33: MODELO DE VIABILIDADE PELOS CRITÉRIOS CLASSIFICATÓRIOS .....	73
FIGURA 34: MODELO DE ÁREAS RESTRITIVAS.....	74
FIGURA 35: MODELO DE VIABILIDADE .....	75

## LISTA DE TABELAS

QUADRO 1: MATRIZ 'A' DE PAREAMENTO ENTRE CRITÉRIOS.....	24
QUADRO 2: INDICADORES DE IMPORTÂNCIA SAATY.....	25
QUADRO 3: VALORES ADOTADOS EM DIFERENTES ESTUDOS RELACIONADOS COM USINAS HELIOTÉRMICAS.....	35
QUADRO 4: BASE DE DADOS ESPACIAIS.....	41
QUADRO 5: SELEÇÃO DOS CRITÉRIOS POR JUSTIFICATIVA E SITUAÇÃO EXIGIDA.....	44
QUADRO 6: MATRIZ A (COMPOSIÇÃO).....	51
QUADRO 7: MATRIZ A (VALORES DE PONDERAÇÕES).....	52
QUADRO 8: MATRIZ A (VALORES DE CONSISTÊNCIA).....	53
QUADRO 9: INTERVALOS LIMÍTROFES DOS SUBCRITÉRIOS.....	56
QUADRO 10: INTERVALOS DE CLASSIFICAÇÃO DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO.....	56
QUADRO 11: INTERVALOS DE CLASSIFICAÇÃO DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO.....	57
QUADRO 12: INTERVALOS DE CLASSIFICAÇÃO DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA .....	57
QUADRO 13: CLASSIFICAÇÃO DE SUBCRITÉRIOS RESTRITIVOS.....	59
QUADRO 14: VALIDAÇÃO (ANÁLISE AMOSTRA 1 – ERNESTINA/SP).....	66
QUADRO 15: NÚMERO DE PROFISSIONAIS COLABORADORES POR INSTITUIÇÃO E POR FORMULÁRIOS RESPONDIDOS.....	67
QUADRO 16: NÚMERO DE PROFISSIONAIS COLABORADORES POR INSTITUIÇÃO E POR FORMULÁRIOS RESPONDIDOS.....	68
QUADRO 17: VALORES DE CONSISTÊNCIA DE CADA QUESTIONÁRIO.....	69
QUADRO 18: PONDERAÇÃO SUBCRITÉRIOS DE PROXIMIDADE À REDE ELÉTRICA (QUESTIONÁRIO 1).....	70
QUADRO 19: PONDERAÇÃO SUBCRITÉRIOS DE PROXIMIDADE À INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (QUESTIONÁRIO 2).....	70
QUADRO 20: PONDERAÇÃO DE SUBCRITÉRIOS DE USO DO SOLO (QUESTIONÁRIO 3).....	70
QUADRO 21: PONDERAÇÃO ENTRE CRITÉRIOS (QUESTIONÁRIO 4).....	71
QUADRO 22: VALIDAÇÃO (ANÁLISE DE INCONSISTÊNCIAS).....	76

## LISTA DE SIGLAS

<i>AHP</i>	– <i>Analytic Hierarchy Process</i> (Processo de Análise Hierárquica)
ANA	– Agência Nacional de Águas
ANEEL	– Agência Nacional de Energia Elétrica
CCP	– Coletor cilindro-parabólico
CESP	– Companhia Energética de São Paulo
CLP	– Combinação Linear Ponderada
<i>CSP</i>	– <i>Concentrated Energy Power</i> (Energia Solar Concentrada)
<i>DNI</i>	– <i>Direct Normal Irradiance</i> (Irradiação Normal Direta)
EPE	– Empresa de Pesquisa Energética
GIZ	– Agência Alemã de Cooperação Internacional
IBGE	– Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LACTEC	– Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento
<i>MCDA</i>	– <i>Multicriteria Decision Analysis</i> (Análise de Decisão Multicritério)
MCTI	– Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
SIG	– Sistemas de Informação Geográfica
SGR	– Sistema Geodésico de Referência
SNIRH	– Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos

## SUMÁRIO

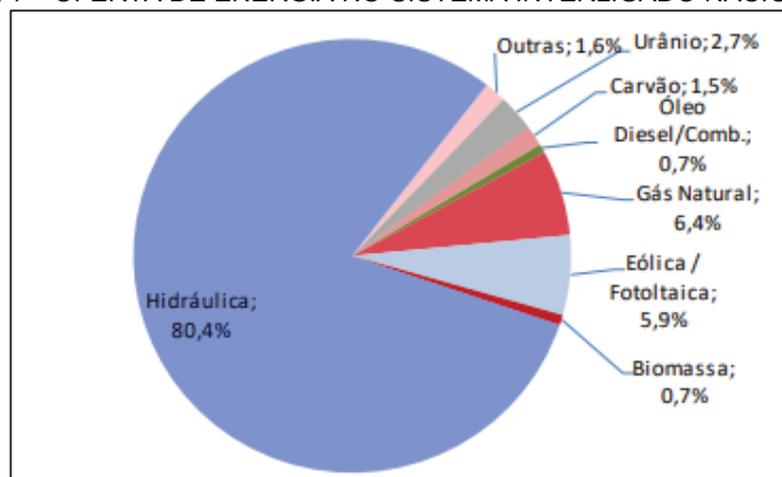
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
1.1. JUSTIFICATIVA.....	17
1.2. OBJETIVOS.....	17
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>19</b>
2.1. ENERGIA HELIOTÉRMICA OU ENERGIA SOLAR CONCENTRADA.....	19
2.1.1. CSP por CCP.....	19
2.1.2. Planejamento de construção de usinas heliotérmicas .....	21
2.2. PRECONDIÇÕES GEOGRÁFICAS / CRITÉRIOS .....	22
2.3. MCDA BASEADO EM SIG .....	23
2.4. PROCESSO DE ANÁLISE HIERÁRQUICA (AHP).....	24
2.5. ANÁLISE DE DADOS GEOESPACIAIS .....	27
2.5.1. Álgebra de mapas.....	28
2.5.2. Modelo de Combinação Linear Ponderada (CLP) .....	29
2.5.3. Lógica booleana e lógica difusa.....	30
2.6. AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO MODELO GEOESPACIAL.....	32
2.7. ESTADO DA ARTE DO PROCESSO AHP BASEADO EM ANÁLISE ESPACIAL EM SIG .....	33
<b>3. MATERIAIS</b> .....	<b>36</b>
3.1. ESTUDO DE CASO.....	36
3.2. CRITÉRIOS SELECIONADOS E BASE DE DADOS ESPACIAIS.....	37
3.2.1. Incidência de irradiação solar .....	37
3.2.2. Topografia.....	39
3.2.3. Rede de transmissão de energia elétrica.....	39
3.2.4. Recursos Hídricos .....	39
3.2.5. Infraestrutura de transporte .....	40
3.2.6. Uso e ocupação do solo .....	40
3.2.7. Meio ambiente e comunidades tradicionais .....	40
3.2.8. Restrições.....	40
3.3. SOFTWARE .....	42
<b>4. METODOLOGIA</b> .....	<b>43</b>
4.1. DEFINIÇÃO DE CRITÉRIOS.....	44

4.2.	MCDA – AHP .....	45
4.3.	QUESTIONÁRIOS .....	45
4.3.1.	Quantidade de participações .....	51
4.3.2.	Equações de ponderação .....	51
4.4.	PROCESSAMENTO DOS DADOS CARTOGRÁFICOS .....	53
4.4.1.	Coleta de dados cartográficos .....	53
4.4.2.	Sistema geodésico de referência e projeção cartográfica .....	53
4.4.3.	Definição da escala e resolução espacial dos dados .....	53
4.4.4.	Adequação dos dados em Raster (Rasterização) .....	54
4.4.5.	Padronização dos valores dos dados .....	55
4.4.6.	Álgebra de mapas.....	59
4.5.	VALIDAÇÃO DOS MODELOS GERADOS.....	63
4.5.1.	Validação dos dados geoespaciais modelados .....	63
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>67</b>
5.1.	QUESTIONÁRIOS .....	67
5.1.1.	Caracterização dos participantes do questionário .....	67
5.1.2.	Valores de consistência .....	69
5.1.3.	Ponderações dos subcritérios e critérios .....	70
5.2.	MODELO DE VIABILIDADE .....	71
5.3.	VALIDAÇÃO DO MODELO .....	75
5.4.	REPRESENTAÇÃO DO MODELO DE ANÁLISE MULTICRITÉRIO ESPACIAL DE VIABILIDADE EM MAPAS .....	78
5.4.1.	Mapa da análise das regiões do Brasil .....	78
5.4.2.	Mapa da análise da região sul .....	80
5.4.3.	Mapa da análise da região centro-oeste.....	82
5.4.4.	Mapa da análise região sudeste .....	84
5.4.5.	Mapa da análise da região nordeste.....	86
5.4.6.	Mapa da análise da região norte .....	88
<b>6.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>90</b>
6.1.	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	90
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>93</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As fontes de energia renováveis são a principal composição da matriz de geração de energia elétrica no Brasil. No primeiro trimestre de 2019 representaram 87% da produção total, enquanto os demais 13% foram gerados por combustíveis fósseis (ANEEL, 2019). Comparada a média mundial, que no ano de 2016 apontava somente 24% da geração baseada em fontes renováveis e o restante de 86% em não renováveis, o Brasil possui uma produção eficiente de energia renovável (EPE(1), 2019). Apesar do índice favorável de 87%, cerca de 80% está concentrada em fontes hidráulicas (Figura 1), sendo as demais, eólica, solar e biomassa, responsáveis por somente 7%, comprometendo a estabilidade da geração de energia por fontes renováveis pelo baixo percentual de diversificação.

FIGURA 1 – OFERTA DE ENERGIA NO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL (SIN)



FONTE: Boletim de informações gerenciais (ANEEL, 2019)

Esta dependência pela fonte hidráulica, relacionada a fenômenos climáticos extremos, como a seca, trazem riscos a matriz energética do país pelas chamadas “panes hídricas”. As reduções nos níveis de água afetam a geração hidráulica, sendo necessária a compensação energética pelo uso de combustíveis fósseis, poluentes e, neste caso, de maior custo, afetando tanto o ecossistema como a economia brasileira (SOUZA; CAVALCANTE, 2017). A energia heliotérmica, também conhecida como termossolar ou internacionalmente como energia solar concentrada – *Concentrated Solar Power (CSP)*, torna-se uma alternativa emergente para diversificação da matriz renovável. As plantas heliotérmicas contam com sistemas de armazenamento do calor produzido, permitindo o controle da produção e liberação

do fluxo produzido, sendo considerada uma forma despachável de energia. Neste contexto, Souza e Cavalcante (2017) destacam que o Brasil registra valores de irradiação solar acima do mínimo necessário para um desempenho efetivo de tecnologias *CSP*, especificamente a irradiação direta normal (*DNI*), que é a pré-condição essencial ao funcionamento da tecnologia.

As tecnologias *CSP* podem ser classificadas em quatro subsistemas: Coletores Cilindro-parabólico (CCP), Refletor Linear Fresnel, Torre Solar, e Disco com motor Stirling. O subsistema com maiores investimentos é a concentração solar por CCP, sendo a Espanha e os Estados Unidos líderes em produção, enquanto China, Índia, Chile, África do Sul e países do Oriente-Médio, têm investido significativamente na tecnologia devido ao alto potencial de *DNI* de seus países (SHI, 2015).

A implantação de uma usina *CSP* por tecnologia CCP, tem como parâmetro inicial o planejamento de sua localização geográfica. Neste âmbito, são utilizados métodos de apoio à tomada de decisão para determinação dos melhores locais conforme condições locais. As abordagens padrões seguem análises multicritérios (*MCDA*), com variações da quantidade de condições, processos de ponderação e tratamento dos dados geoespaciais, permitindo comparar diferentes alternativas, através da abordagem e ponderação de critérios (SENGUPTA et al., 2017; PEREIRA et. al. 2014).

Como base para este estudo foi utilizado o Projeto de Energia Heliotérmica do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações (MCTI) junto a Agência Alemã de Cooperação Internacional, *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* (GIZ), em que são propostas 12 condições que contemplam fatores físicos e sociais. Além destes critérios iniciais, é indicado elencar subcritérios para identificar todas as características locais necessárias à implantação da tecnologia.

Para a análise espacial das condições, cada uma deve conter uma componente geoespacial, determinando sua localização geográfica. Desta forma, são obtidos dados geoespaciais e seus metadados, possibilitando a análise por meio de processamento por técnicas inseridas em Sistemas de Informação Geográfica (SIG), como a álgebra de mapas. A *MCDA* quando usada junto ao SIG, é referida na literatura como *MCDA* baseada em SIG (MALCZEWSKI, 2006; GREENE et al., 2011).

Neste estudo é proposta uma metodologia de *MCDA* pelo uso do processo de análise hierárquica (*AHP*) para ponderação dos critérios através de matrizes de pareamento compostas por dados obtidos através de questionários destinados a profissionais especializados na tecnologia *CSP* e áreas correlatas. A análise das alternativas será realizada pelo uso de SIG, com camadas de informação para cada critério, tratadas, padronizadas e combinadas com as ponderações do processo *AHP*, para, por modelagem cartográfica por álgebra de mapas, gerar um modelo de viabilidade de locais para implantação da tecnologia discutida. Não serão efetuadas análises quanto ao critério financeiro. Para o processamento dos dados, serão utilizados softwares e ferramentas livres de geoprocessamento, especificamente o software QGIS e suas bibliotecas.

### 1.1. JUSTIFICATIVA

O estudo está baseado em um projeto de incentivo ao desenvolvimento de energias renováveis solares no Brasil, o P&D Estratégico ANEEL chamada nº 019/2015 (PD-00061-0050/2016), intitulado “Implantação de Usina Piloto por meio de Integração da Fonte de Geração Termosolar ao complexo de energias alternativas renováveis da Usina Hidrelétrica Porto Primavera”.

Desta forma, justifica-se este trabalho pelo fomento à energia heliotérmica no Brasil, e pela quantidade reduzida de estudos referentes ao uso de análise multicritério em softwares de SIG livres, para determinação da localização ótima de usinas heliotérmicas.

### 1.2. OBJETIVOS

O objetivo é utilizar metodologia *MCDA* como instrumento de apoio na definição de índices de viabilidade à instalação de usina *CSP* por CCP para diferentes locais.

Deste se destacam os objetivos específicos oriundos da metodologia proposta:

- Selecionar e avaliar as precondições que afetam a tecnologia;
- Definir ponderações aos diferentes critérios por meio de profissionais especializados na área *CSP*;

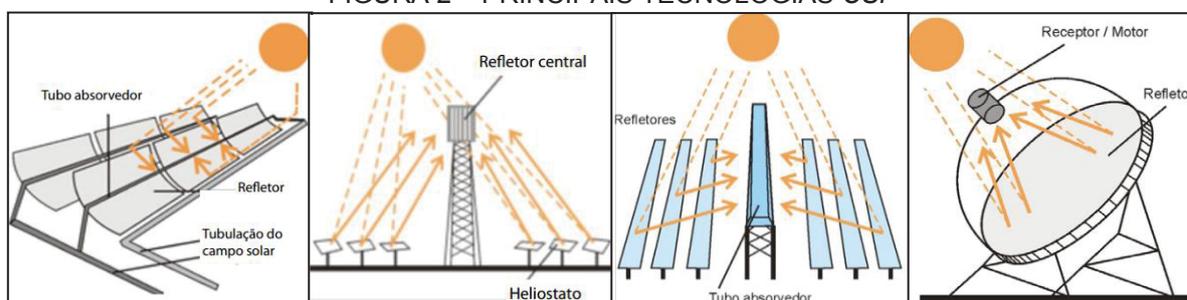
- Estabelecer uma metodologia de processamento dos dados geoespaciais consistente;
- Avaliar a qualidade e acurácia dos modelos resultantes a partir de técnicas de validação;
- Gerar representações gráficas com a indicação dos índices de viabilidade.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. ENERGIA HELIOTÉRMICA OU ENERGIA SOLAR CONCENTRADA

A energia heliotérmica é descrita pela produção de energia elétrica a partir de um ciclo termodinâmico pela concentração de energia solar. As principais tecnologias de coleta por concentração solar são: Cilindro-parabólico; Torre solar; Disco parabólico; e refletores Fresnel (Figura 2).

FIGURA 2 – PRINCIPAIS TECNOLOGIAS CSP



FONTE: SolarPACES (2013) apud. PEREIRA et. al. (2014)

De acordo com Schlipf et. al. (2014), 93,7% do potencial total instalado de energia heliotérmica é pela tecnologia de coletores cilindro-parabólicos (CCP), sendo a mais utilizada mundialmente dentre as tecnologias disponíveis.

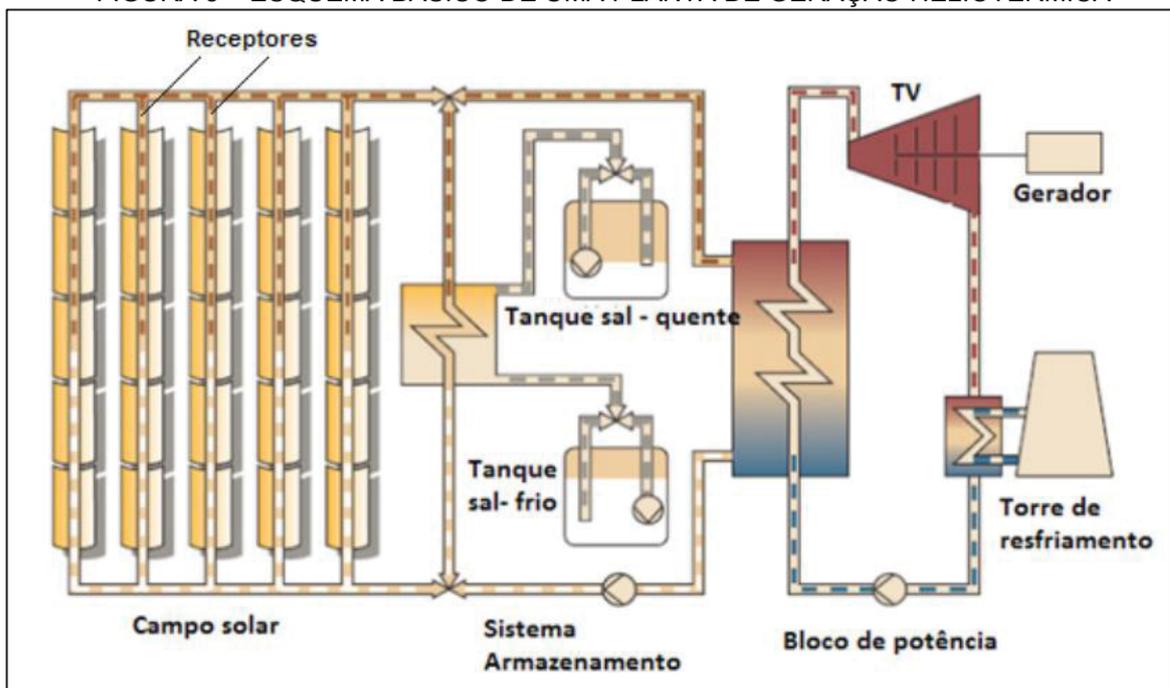
#### 2.1.1. CSP por CCP

O sistema de geração heliotérmica de energia por CCP é composto por três fases: campo solar; bloco de potência; e armazenamento térmico (PEREIRA et. al. 2014). Na Figura 3, é representado o ciclo básico de uma planta de geração heliotérmica, em que:

- O campo solar compreende um sistema de espelhos em formato cilíndrico com concavidade parabólica com sistema de rastreamento solar que concentram a componente direta da irradiação solar (*DNI*) em um eixo, ocupado por um tubo metálico com fluido térmico de transferência de calor (óleo sintético ou sal fundido). A energia térmica é então conduzida a blocos de potência e/ou blocos de armazenamento.

- Nos blocos de potência, o calor entra em contato com um sistema de resfriamento e produz vapor, este passa através de um sistema de turbinas, produzindo energia mecânica e posteriormente eletricidade;
- Os blocos de armazenamento térmico possibilitam a flexibilidade de geração de energia da planta pelo despacho do calor para produção da energia elétrica.

FIGURA 3 – ESQUEMA BÁSICO DE UMA PLANTA DE GERAÇÃO HELIOTÉRMICA



FONTE: Solar Millenium (2010) apud. PEREIRA et. al. (2014)

Energias despacháveis são independentes das condições climáticas locais ou de momentos de sol, tornando assim a energia *CSP* mais confiável em relação a energias não despacháveis como a fotovoltaica e a eólica (PEREIRA et. al., 2014; SCHLECHT; MEYER, 2012). Dentro da tecnologia há os sistemas refrigerados a água, que utilizam fontes hídricas para resfriamento tornando o sistema mais eficiente e com menos custos comparado ao sistema a seco, que utiliza um sistema de resfriamento a ar, mais custoso e sem necessidade de água (SCHLECHT; MEYER, 2012).

De acordo com PEREIRA et. al. (2014), a área média para operação de usinas *CSP* por CCP é de 3 ha/MW, enquanto as dimensões dos espelhos cilindro-parabólicos são acima de dois metros de altura por dois metros de comprimento, como observado na Figura 4.

FIGURA 4 – CONJUNTO DE ESPELHOS DE USINA ANDASOL 1 (50MW, ESPANHA)



FONTE: COBRA / SOLAR MILLENIUM (2018)

### 2.1.2. Planejamento de construção de usinas heliotérmicas

Segundo SCHLIPF et. al. (2014), na cadeia de valor de planejamento de usinas heliotérmicas, os elementos iniciais visam o desenvolvimento do projeto através da avaliação do local de construção, consultoria jurídica e financeira, e de Engenharia de Proprietário (Figura 5). Somente após estes, a fase de construção se inicia, com as autorizações e negociações contratuais, assim como a preparação do terreno e aparatos de construção da planta.

FIGURA 5 – CADEIA DE VALOR DE PLANEJAMENTO DE USINAS HELIOTÉRMICAS



FONTE: SCHLIPF et. al. (2014)

Como um dos primeiros elementos, tem-se a avaliação do local geográfico para instalação de uma usina heliotérmica. Este elemento visa determinar a viabilidade dos possíveis locais de construção quanto às condições físicas que contribuem ao projeto, com destaque a avaliação da condição do recurso solar (SCHLIPF et. al., 2014; SENGUPTA et al., 2017; SCHLECHT; MEYER, 2012).

## 2.2. PRECONDIÇÕES GEOGRÁFICAS / CRITÉRIOS

Para determinar a viabilidade quanto a localização geográfica da implantação da usina Heliotérmica por CCP é necessário definir algumas condições físicas locais, também chamados de critérios. PEREIRA et. al. (2014) em um trabalho do Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação do Brasil junto a cooperativa alemã GIZ, propõe os seguintes critérios iniciais:

- Irradiação normal direta – *DNI*;
- Topografia do terreno;
- Rede elétrica;
- Infraestrutura de transporte;
- Recursos hídricos;
- Propriedades do solo;
- Impacto Ambiental;
- Fornecimento de combustível;
- Condições climáticas;
- Sismologia;
- Aceitação social;
- Permissões e Licenças.

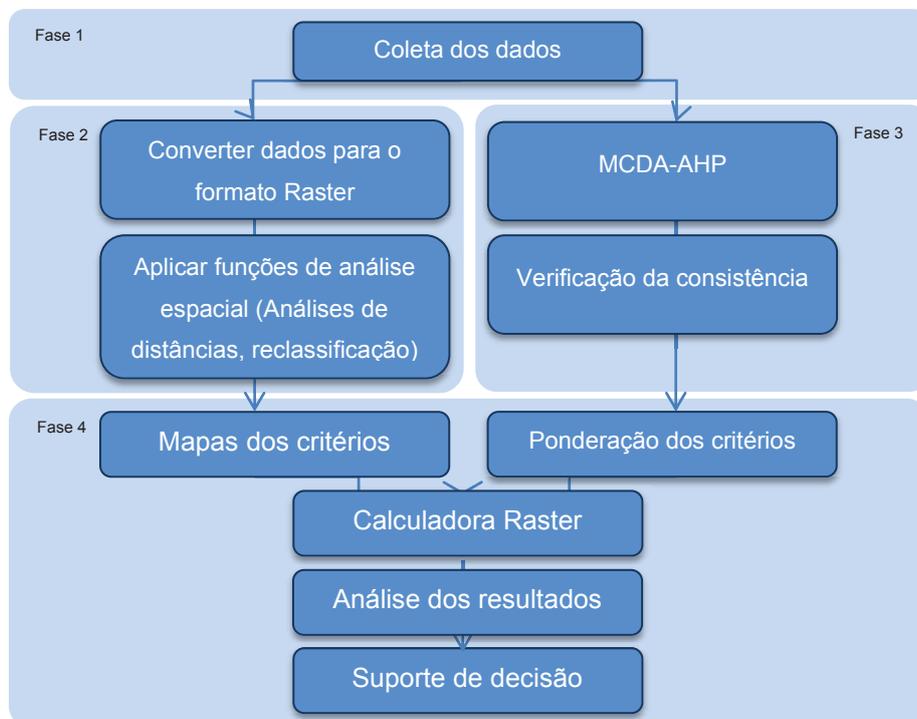
Para apreciação dos critérios e como auxílio à tomada de decisão espacial são adotadas análises multivariadas, que permitem a análise dos critérios pela ponderação, combinação e relacionamento entre os atributos das variáveis, através de informações geográficas (HARVEY, 2008). Um exemplo é a metodologia *MCDA* baseada em SIG.

### 2.3. MCDA BASEADO EM SIG

O método *MCDA* permite a análise do potencial de alternativas baseado em múltiplos critérios, mensuráveis e imensuráveis, através de regras de decisão, tornando possível a visualização e implicações de cada critério. Enquanto a finalidade do SIG é de inserir o processo de decisão espacial entre as interações das precondições e as alternativas. O método é chamado de *MCDA* baseado em SIG, do inglês *GIS-based MCDA* (MALCZEWSKI, 2006; GREENE et al., 2011).

Siddayao et al. (2014) integra o processo *AHP*, ao processamento de dados geoespaciais e define etapas de processamento e ponderação. O método é subdividido em 4 fases: Fase 1, para definição do problema e coleta de dados; Fase 2, processamento de padronização dos dados espaciais; Fase 3, processo *MCDA* para ponderação dos dados, realizado em conjunto da avaliação de profissionais especializados; Fase 4, etapa da integração entre as camadas de dados geográficos padronizadas e a ponderação dos critérios, seguido da sobreposição das camadas e geração do modelo final. Conforme Figura 6.

FIGURA 6 – METODOLOGIA DE INTEGRAÇÃO DA ANÁLISE ESPACIAL COM MCDA-AHP



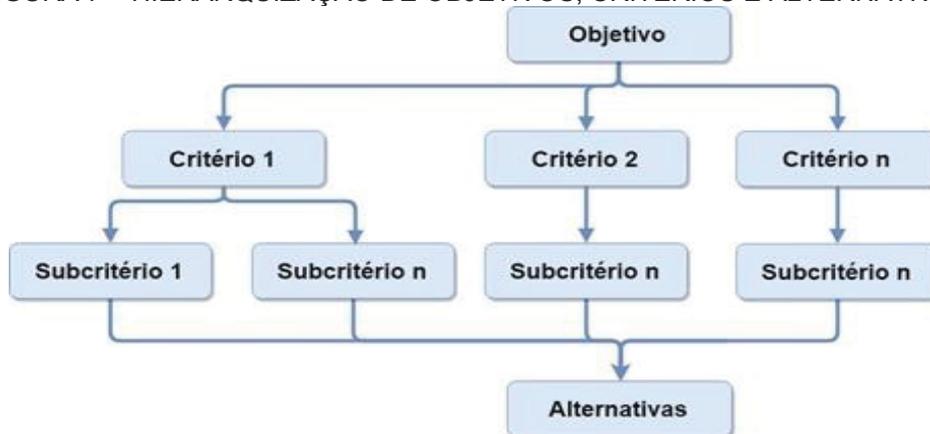
FONTE: Siddayao et al. (2014)

## 2.4. PROCESSO DE ANÁLISE HIERÁRQUICA (AHP)

Um *MCD*A utilizado amplamente é o *AHP*. Segundo Saaty (2008), o método consiste na comparação pareada dos critérios e pode ser aplicado em diversos casos e em diferentes níveis de hierarquia, seguindo as três etapas:

1. Definir o problema de decisão;
2. Estruturar a hierarquia de tomada de decisão, partindo do topo com o objetivo principal, seguindo com os objetivos de ampla perspectiva (critérios) e subsequentes objetivos de nível abaixo (subcritérios), até o último nível em que são apresentadas as alternativas (Figura 7);
3. Construir matrizes par a par (Quadro 1) para cada nível de critérios e usar os valores dos pesos obtidos para as matrizes de comparação de nível superior para ponderar sobre os pesos das matrizes de nível abaixo. Repetir sucessivamente para cada critério e nível para se obter o peso global de todos subcritérios.

FIGURA 7 – HIERARQUIZAÇÃO DE OBJETIVOS, CRITÉRIOS E ALTERNATIVAS *AHP*



FONTE: O autor (2020).

QUADRO 1 – MATRIZ 'A' DE PAREAMENTO ENTRE CRITÉRIOS

	C1	C2	...	Cn
C1	$1_{1,1}$	$1_{1,2}$	$1_{1,\dots}$	$1_{1,n}$
C2	$2_{1,1}$	$1_{2,2}$	...	$2_{2,n}$
...	$\dots,1$	...	...	...
Cn	$n_{1,1}$	$n_{1,2}$	...	$1_{n,n}$

FONTE: O autor (2020)

A matriz de comparação dos elementos é uma matriz quadrada em que as linhas e colunas são formadas por critérios. Assim, na comparação da matriz 'A', o valor  $A_{ij}$  representa a importância do critério da linha i em relação ao critério da coluna j. Essa matriz é espelhada ao inverso dos valores.

Os valores de importância utilizados na matriz são dispostos pela escala de indicadores de Saaty, que determina o grau do valor, o seu indicador e sua característica. Conforme Quadro 2.

QUADRO 2 – INDICADORES DE IMPORTÂNCIA SAATY.

Grau	Indicador	Característica
1	Igual importância	Os dois critérios contribuem igualmente ao objetivo.
3	Importância fraca	O critério é levemente mais considerável.
5	Importância forte	O critério é mais decisivo que o relacionado
7	Importância muito forte	O critério é dominante em relação ao outro.
9	Importância absoluta	O critério se sobressai de forma absoluta ao relacionado.
2,4,6,8	Valores intermediários	Valores de importância intermediários aos demais.

FONTE: Adaptado de Saaty (2008)

O estabelecimento dos valores de importância é chamado de regra de decisão e define toda a estruturação do método *AHP* (CARRIÓN et al., 2008). Uma das formas de obtenção destes valores é através de métodos de entrevista com profissionais capacitados no perfil do projeto, de forma a se obter informações sobre a importância das condições visando o alcance do objetivo. Saaty (2004) propõe que a quantidade ideal de participações de profissionais pode ser obtida pela equação (1):

$$R = n(n - 1)/2 \quad (1)$$

Em que:

R = número de respostas;

n = ordem da matriz de maior valor.

Após consulta e preenchimento das matrizes, são determinadas a matriz comparativa, os pesos dos critérios e os três indicadores de consistência: o Índice

de Consistência (IC); o Índice de Consistência Aleatória (IA); e a Razão da Consistência (RC) (SAATY, 2006).

A matriz comparativa é composta pelo resultado da consulta aos profissionais. Já o peso dos critérios é obtido a partir do vetor de Eigen ou vetor de prioridade, calculado pela média aritmética da determinação dos pesos relativos dos critérios, estes pesos são determinados com a normalização da matriz inicial.

Obtidos os pesos, o próximo passo é calcular a consistência dos dados. O IC é baseado no número principal de Eigen, que é o somatório do produto de cada elemento do vetor de Eigen, multiplicados pelo total da respectiva coluna da matriz comparativa. Para o cálculo do IC é utilizada a equação (2), em que  $\lambda_{max}$  é o número principal de Eigen e 'n' é o número de critérios avaliados.

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{(n-1)} \quad (2)$$

Visando verificar o IC, Saaty (2006) propôs o índice RC, determinado pela razão entre o IC e o índice IA tabelado conforme número de critérios (Figura 8), calculado pela equação (3).

FIGURA 8 – ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA ALEATÓRIA (IA)

Ordem	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IA	0	0	0.52	0.89	1.11	1.25	1.35	1.40	1.45	1.49

FONTE: Saaty (2006)

$$RC = \frac{IC}{IA} \quad (3)$$

Saaty ainda sugere que o RC apresente um valor igual ou inferior a 0,10, desta forma o processo é tido como consistente, pois apresenta no máximo 10% de inconsistência na contribuição dos profissionais com as matrizes de comparação.

## 2.5. ANÁLISE DE DADOS GEOESPACIAIS

No Brasil, o Decreto nº 6.666 de 27 de novembro de 2008, define os dados geoespaciais como:

O dado que se distingue essencialmente pela componente espacial, que associa a cada entidade ou fenômeno uma localização na Terra, traduzida por sistema geodésico de referência, em dado instantâneo ou período de tempo, podendo ser derivado, entre outras fontes, das tecnologias de levantamento [...], bem como de mapeamento ou de sensoriamento Remoto (BRASIL, 2008).

A abstração do mundo real a partir de dados geoespaciais é um importante fator para modelagem da realidade geográfica por Sistemas de Informação Geográfica (SIG).

Segundo Goodchild (1992), a abstração do mundo real pode ser compreendida por dois modelos:

- Campos: São as feições geográficas contínuas, em que os fenômenos possuem distribuições infinitas e localização indefinida no espaço geográfico. Por exemplo: Temperatura.
- Objetos: São as feições geográficas discretas, em que a distribuição e a localização do fenômeno são identificáveis em relação ao seu entorno, possuindo geometria, posição e características definidas. Por exemplo: Linhas de rede elétrica.

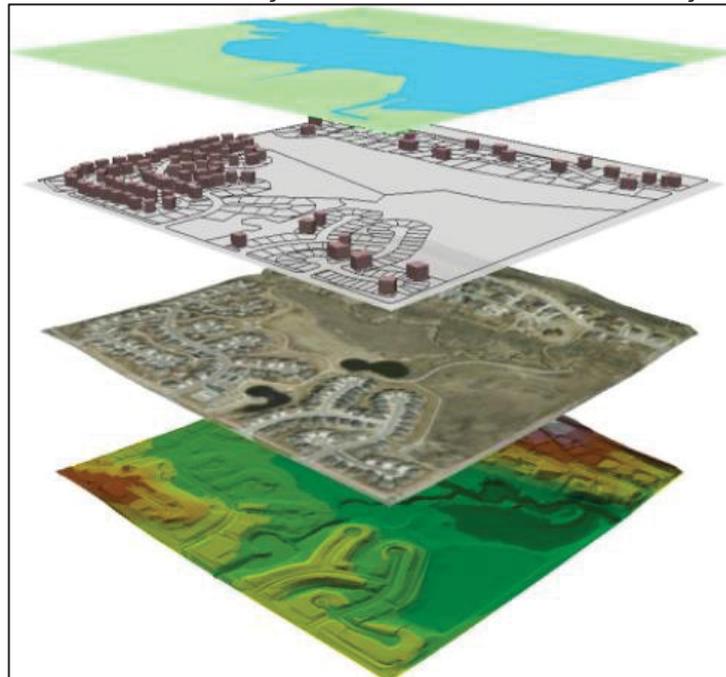
O autor ressalta que a representação de dados contínuos (modelo de campos) é realizada pela discretização de regiões consideradas homogêneas. Enquanto para dados discretos (modelo de objetos) é realizada pela generalização de uma área aproximadamente homogênea em valores.

Estes dados são manipulados em softwares de SIG e utilizados em modelagens, como: na determinação de rotas ótimas; análises de produção agrícola; pesquisas para controle de recursos naturais; e determinação geográfica de empreendimentos (HARVEY, 2008).

### 2.5.1. Álgebra de mapas

A álgebra de mapas é uma das formas de modelagem de dados realizada em softwares SIG. Consiste na combinação de duas ou mais camadas de informações ou dados espaciais (HARVEY, 2008). Na Figura 9, é esquematizada a combinação de camadas de recursos naturais, cadastro urbano e modelo digital de terreno, obtendo-se o modelo resultante graduado.

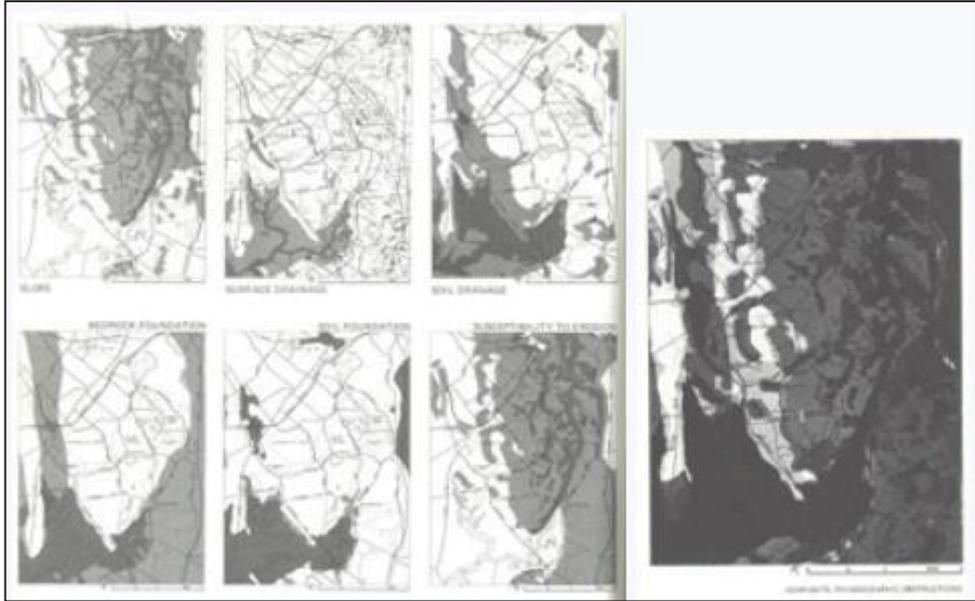
FIGURA 9 – COMBINAÇÃO DE CAMADAS DE INFORMAÇÕES



FONTE: OERN (2014).

A utilização do método em projetos de engenharia teve início em 1968 com McHarg, como auxílio à tomada de decisão espacial para determinar o melhor traçado de uma rodovia. O local do estudo foi abordado através de imagens que representavam parâmetros de valores sociais e de dificuldades fisiográficas, sendo que a combinação de ambos os fatores representava as obstruções para construção da rodovia. Utilizando um sistema de cores fortes e claras, respectivamente mais e menos obstruções, o autor projetou os parâmetros analisados com as cores em mapas com transparência. Ao combinar os mapas, determinou o corredor mais claro no modelo resultante, e assim, o caminho com menos obstruções para a construção da rodovia, conforme Figura 10 (MCHARG; STEINER, 1998).

FIGURA 10 – DETERMINAÇÃO DO MELHOR CORREDOR PARA TRAÇADO DA RODOVIA



FONTE: McHarg; Steiner (1998)

### 2.5.2. Modelo de Combinação Linear Ponderada (CLP)

Uma das formas de manipulação dos dados é pelo modelo CLP, que utiliza operadores algébricos e modelagem cartográfica no auxílio à tomada de decisão. Malczewski (2000) destaca que na aplicação do modelo, os dados geoespaciais de entrada devem ser mensuráveis permitindo a atribuição de valores numéricos e possibilitando o uso de equações algébricas. Para tal, são organizados em formato Raster, sendo que cada célula (pixel) apresenta um atributo de localização com coordenadas, e um atributo numérico associado à sua representação da realidade (valor do pixel). Por fim, cada pixel se torna uma alternativa de decisão (4):

$$V(x_i) = \sum_j w_j v_j(x_i) = \sum_j w_j r_{ij} \quad (4)$$

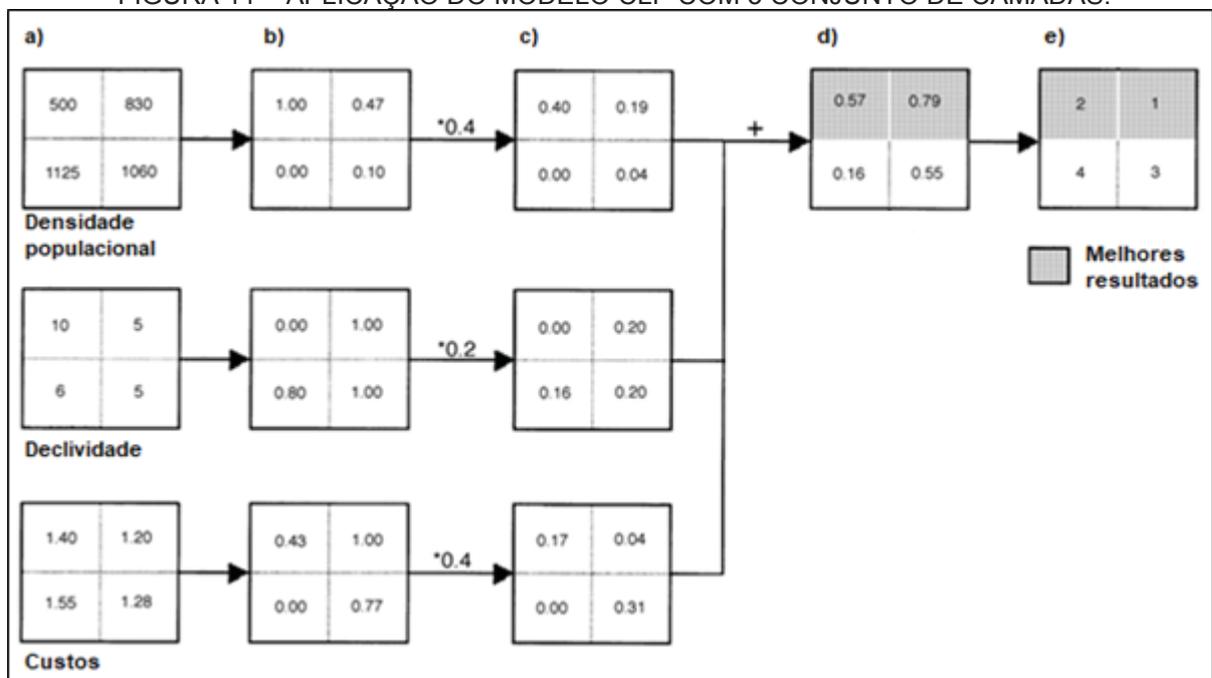
Em que:

- $w_j$  Representa o peso normalizado (a importância relativa do atributo);
- $r_{ij}$  Representa o valor do atributo de cada localização ( $x_i$ ) (transformado em uma escala comparável);
- $V(x_i)$  Representa os valores finais das alternativas de decisão para cada atributo de localização.

O autor classifica o método em cinco etapas, conforme Figura 11:

- Obter um conjunto de camadas de informações geográficas em estrutura raster, em que o pixel representa o atributo da feição;
- Classificar e padronizar os diferentes valores de atributos;
- Atribuir pesos as camadas a partir de operações algébricas nos pixels;
- Combinar as camadas por operações algébricas;
- Ranquear os pixels, para obtenção da melhor alternativa.

FIGURA 11 – APLICAÇÃO DO MODELO CLP COM 3 CONJUNTO DE CAMADAS.



FONTE: Adaptado de Malczewski (2000).

### 2.5.3. Lógica booleana e lógica difusa

Uma das etapas anteriores ao CLP é o tratamento e padronização dos dados. Huisman, De By (2009) destaca as diferenças no tratamento quanto as estruturas de representação das feições da superfície terrestre, por dados discretos ou dados contínuos. Os dados discretos, como o uso do solo, são passíveis de divisão, pois contém limites bem definidos e podem ser classificados ou binarizados, através da lógica booleana.

A lógica booleana determina limites bem definidos, de forma que estes devem pertencer ou não a um grupo, alternando entre 0 (falso) e 1 (verdadeiro).

Representada pela equação (5), em que se o intervalo entre  $b_1$  e  $b_2$  é atribuído com o valor 1, caso contrário, 0.

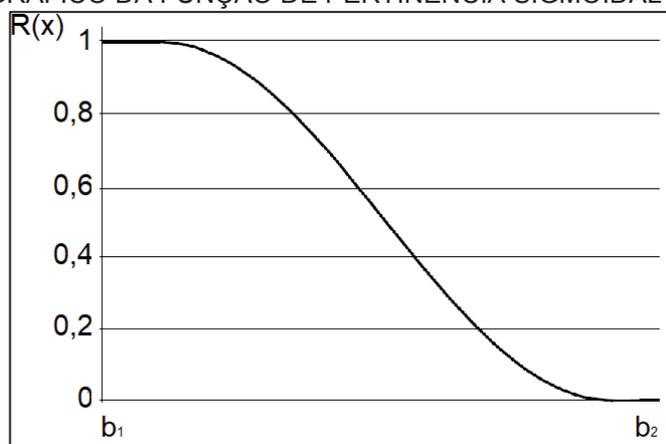
$$R(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } b_1 \geq x \geq b_2 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (5)$$

Quando se trata de dados contínuos, a discretização pode ser aplicada em um processo de tornar variáveis contínuas em contrapartes discretas, seguindo uma lógica binária ou booleana, abrangendo apenas dois intervalos (falso ou verdadeiro). Porém, no tratamento de dados contínuos a lógica difusa tem as vantagens de possibilitar a modelagem lógica (sobreposição de mapas) a partir de dados inexatos, e permitir o uso de expressões de linguagem natural para qualificar incertezas em dados contínuos (Huisman; De By, 2009).

Assim como a lógica booleana, a lógica difusa também utiliza limites bem definidos, porém, considerando a continuidade e incerteza dos valores contínuos dentro de um intervalo de 0 (totalmente falso) e 1 (totalmente verdadeiro). Um exemplo de função de pertinência é a Sigmoidal Decrescente, conforme Figura 12 e equação (6), em que valores no intervalo entre  $b_1$  e  $b_2$  são atribuídos do valor resultante da expressão  $\frac{(x_{\text{máx}}-x_i)}{(x_{\text{máx}}-x_{\text{mín}})}$ , e quando maior que  $b_2$  são iguais a 0.

$$R(x_i) = \begin{cases} \frac{(x_{\text{máx}}-x_i)}{(x_{\text{máx}}-x_{\text{mín}})}, & \text{se } b_1 \leq x_i \leq b_2 \\ 0, & \text{se } x > b_2 \end{cases} \quad (6)$$

FIGURA 12 – GRÁFICO DA FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA SIGMOIDAL DECRESCENTE



FONTE: O autor (2020).

## 2.6. AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO MODELO GEOESPACIAL

Para garantir a consistência da análise dos dados espaciais, é realizada a etapa de validação do modelo gerado. Carrión et. al. (2008) cita três formas de validação:

- Comparação pixel a pixel: que consiste na comparação dos modelos referentes a cada critério com dados cartográficos externos a metodologia, como imagens de satélites e mapas;
- Análise visual: é a análise da região com o maior índice e dados cartográficos que comprovem os bons resultados à região.
- Visitas *in situ* – é a determinação de amostras e visitas a campo nos locais das amostras para comprovar o índice local.

Pela falta de referencial utilizando estas técnicas, foram obtidos documentos oficiais de avaliação da qualidade de dados geoespaciais, que seguem padrões internacionais da Organização Internacional de Normalização pela norma 19157:2013 (ISO, 2013); O manual técnico da avaliação da qualidade dos dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2017); E a norma da especificação técnica para controle da qualidade de dados geoespaciais (ET-CQDG) da Diretoria de Serviço Geográfico (DCT/DSG, 2016) do Exército brasileiro.

O IBGE (2017) e a DCT/DSG (2016), definem a qualidade dos dados como as características de um produto que lhe conferem conformidade a especificações. Neste sentido, a qualidade deve ser descrita por meio da avaliação de elementos compostos por critérios padronizados que permitem a comparação de diferentes conjuntos, conforme categorias citadas:

- Completude – descreve se os dados estão completos;
- Consistência lógica – descreve se cumprem as regras lógicas;
- Acurácia posicional – descreve o correto posicionamento;
- Acurácia temporal – descreve a validade em relação ao tempo;
- Acurácia temática – descreve a conformidade dos atributos.

## 2.7. ESTADO DA ARTE DO PROCESSO *AHP* BASEADO EM ANÁLISE ESPACIAL EM SIG

Um dos primeiros estudos aplicando análise espacial para energias renováveis solares foi Broesamle et. al. (2001), que ranqueou regiões ao norte da África quanto à estimativa de custo da implantação de plantas heliotérmicas. Neste estudo foram utilizados somente dois critérios, de índice de irradiação solar DNI e planicidade do terreno, sendo o autor responsável pela interpretação da importância de cada critério ao desenvolvimento do estudo.

De forma semelhante, Aras et. al. (2004) pelo uso de análise multicritério, processo *AHP*, analisou 5 localidades pré-definidas para implantação de um sistema de energias renováveis, segundo a interpretação de profissionais especializados na área do estudo. O estudo abordou 5 critérios e 13 subcritérios, obtendo as ponderações a partir de profissionais especializados em diferentes áreas. Desta forma, o autor identificou a melhor alternativa entre as 5 propostas.

Já Brancalhão (2015), utilizou SIG em conjunto com um software específico de modelagem de geração de energia, obtendo a viabilidade técnica e financeira, através das ponderações de responsabilidade do software.

Para analisar regiões com diferentes alternativas e utilizar regras de decisão ponderadas por profissionais especializados, alguns estudos utilizaram a análise multicritério *AHP* em conjunto a análise espacial em SIG (SIDDAYAO et. al., 2014; EFFAT, 2016; AZEVÊDO et.al., 2017). Entretanto, foram verificadas inconsistências quanto à metodologia de análise espacial. Fluri (2009) binariza e classifica dados contínuos, porém dados contínuos são compostos por zonas de transição entre suas distribuições, sendo considerados infinitos logo indivisíveis. Neste ponto, Effat (2016) utiliza lógica difusa, com o uso de funções de pertinência que representem as zonas de transição em intervalos normalizados. Porém, esta técnica quando há diferentes variações de intervalos máximos e mínimos entre os dados, pode inferir diferentes significâncias nas comparações. Para tal, é necessário a discretização de intervalos viáveis para equiparar os diferentes dados sem inferir em sua significância, aspecto adotado apenas por Azevêdo et. al. (2017). Outro fator é a constante utilização de softwares proprietário de SIG ou de modelagem. No Quadro 3 foram tabeladas as principais características encontradas nos estudos abordados (células em branco correspondem a dados não utilizados ou não encontrados).

Contudo, os estudos de AHP baseados em SIG fornecem o ranqueamento do potencial técnico para implantação de energias renováveis nas regiões analisadas, tendo como contestações: A definição das condições e ponderação pelo uso ou não de *MCDA*; O uso de diferentes metodologias de padronização dos dados geoespaciais; E o uso de softwares proprietários. Eventos que impedem ou limitam a reprodução dos resultados.

QUADRO 3 – VALORES ADOTADOS EM DIFERENTES ESTUDOS RELACIONADOS COM USINAS HELIOTÉRMICAS.

<b>Autor</b>	Brosamle, H.	Fluri, T. P.	Clifton J., Boruff J. B.	Brancallão.	Effat, H. A.	Azevêdo et. al.
<b>Ano</b>	2001	2009	2010	2015	2016	2017
<b>Local</b>	Norte da África	África do Sul	Austrália	Brasil	Egito	Pernambuco (Brasil)
<b>Título</b>	<i>Assessment of solar electricity potentials in North Africa [...]</i>	<i>The potential of concentrating solar power in South Africa</i>	<i>Assessing the potential for concentrated solar power development</i>	Sistemas heliotérmicos recurso solar, tecnologia e infraestrutura	<i>Mapping Solar Energy Potential Zones</i>	<i>Location Study Solar Thermal Power plant [...]</i>
<b>MCDA</b>					AHP	AHP
<b>Metodologia de processamento</b>	Classificação	Binarização	Lógica difusa + classificação	Lógica difusa + classificação	Lógica difusa + classificação + CLP	Discretização + lógica difusa + classificação + CLP
<b>Software</b>	STEPS		ArcGIS	SAM, Geospatialtoolkit	ArcGIS	ArcGIS, Spring
<b>(Critérios) DNI</b>	Todo intervalo	7 kWh/m <sup>2</sup> /dia	2000 kWh/m <sup>2</sup>	5 a 12 kWh/m <sup>2</sup> /dia		2100 kWh/m <sup>2</sup>
<b>Declividade</b>	<2% (Binário)	1% (Binário)	4% (Binário)	Máximo de 5% (Binário)	De 0 a >15%, 5 classes	De 0 a >5%, 5 classes
<b>Infraestrutura de transporte</b>			Proximidade (parâmetros não informados)	Distância máxima 10km (Binário)	Distância a rodovias (intervalos SIG)	Dist. de rodovias principais
<b>Infraestrutura elétrica</b>		Distância máxima 20km (Binário)	Proximidade (parâmetros não informados)	Distância máxima 10km (Binário)	Distância a subestações (intervalos SIG)	Distância a linhas de transmissão
<b>Recursos hídricos</b>			Foi desconsiderado devido à abundância local	0,7 l/m <sup>2</sup> de abertura, 63 lavagens ao ano		Foi desconsiderado
<b>Áreas de preservação</b>		Restrição à 2 classes de vegetação	Restrição total à reservas indígenas	Restrição total a áreas de preservação ambiental		Restrição total a áreas de preservação ambiental
<b>Uso do solo</b>			Restrição à corpos d'água e produção agrícola.		Áreas cultivadas, urbanas e água, Vegetação natural, área vazias	Áreas agrícolas

Fonte: O autor (2020).

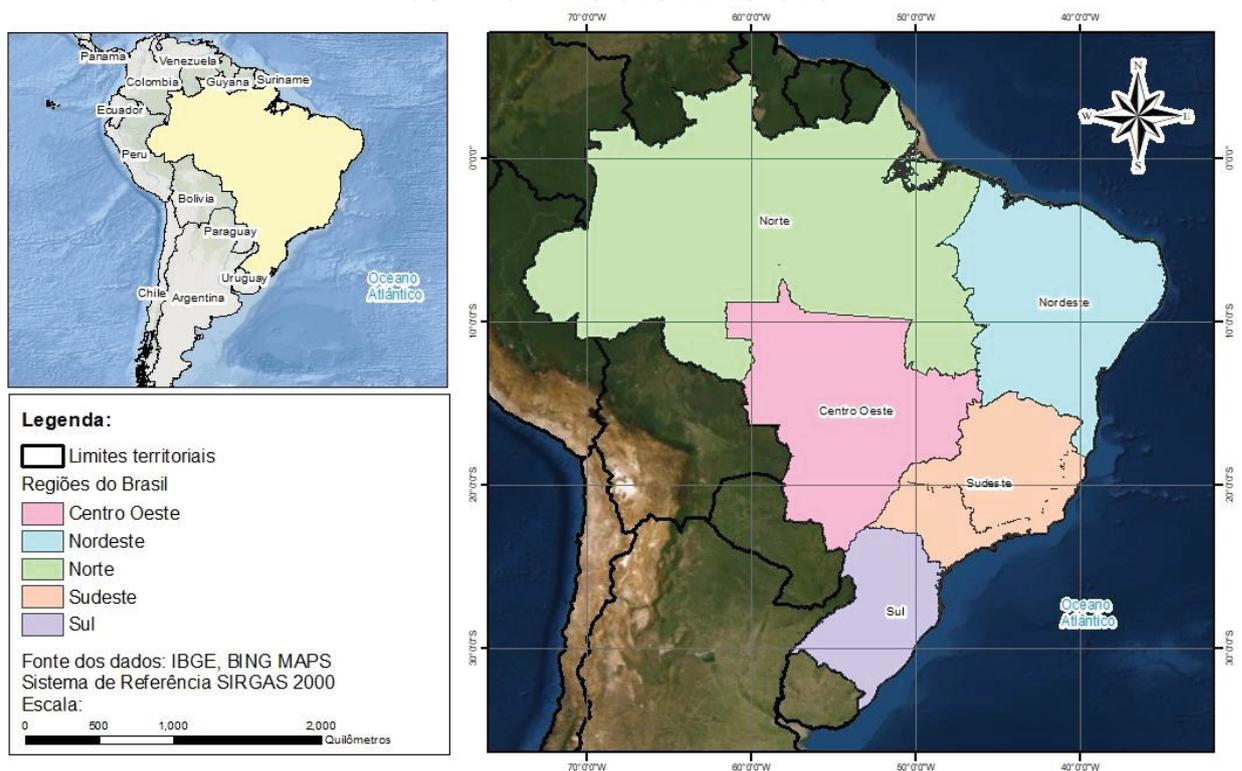
### 3 MATERIAIS

#### 3.1. ESTUDO DE CASO

O estudo foi desenvolvido no LACTEC, junto a Companhia Energética de São Paulo (CESP) e demais empresas colaboradoras, e compôs um P&D Estratégico da ANEEL chamada nº 019/2015 (PD-00061-0050/2016). No escopo do projeto, a etapa de “Descrição dos locais mais adequados ao uso da tecnologia desenvolvida, nas diversas regiões brasileiras”, é a abordada neste projeto.

Para satisfazer esta etapa, foram destinados como locais de estudo as cinco regiões do Brasil: Região Sul, Sudeste, Nordeste, Centro-oeste, Norte. Apresentadas na Figura 13.

FIGURA 13 – REGIÕES DE ESTUDO



FONTE: O autor (2020)

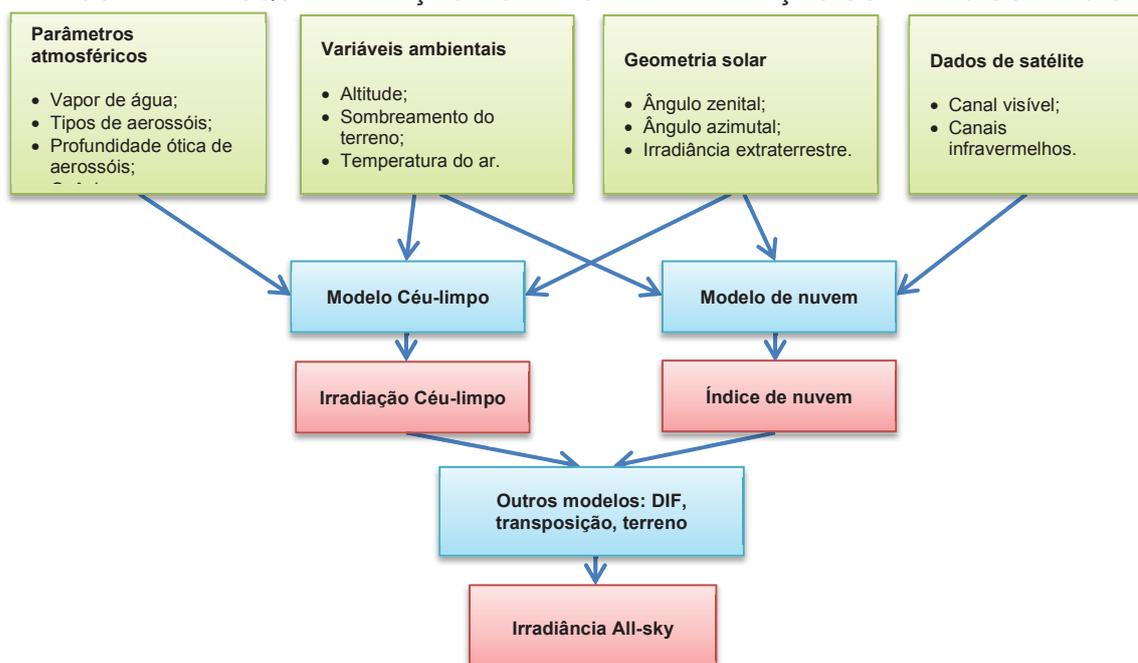
## 3.2. CRITÉRIOS SELECIONADOS E BASE DE DADOS ESPACIAIS

### 3.2.1. Incidência de irradiação solar

O índice de irradiação solar direta foi obtido da organização Solargis. Para geração de um modelo que se aproxima da situação real, o Solargis utiliza séries de dados recentes e históricos, imagens de satélites e algoritmos de identificação de nuvens, parâmetros físicos de atenuação da irradiância solar, além de utilizar modelos numéricos meteorológicos (NWP) para previsão. A geração do modelo pode ser resumida em 3 etapas (Figura 14):

- A partir de parâmetros, indicados em verde, é modelada a irradiância incidente na superfície com o céu sem nuvens, como modelo do céu-limpo, indicado em azul. Com dados de satélite geostacionários é possível quantificar as nuvens em um modelo de nuvem;
- Com os modelos é realizado o cálculo do índice de irradiação e atenuação por cobertura de nuvens, indicado em vermelho.
- Por fim, são utilizados modelos de terreno e superfície, indicados em azul, para cálculo da atenuação por efeitos de sombra causados pelo terreno ou objetos, indicados em vermelho.

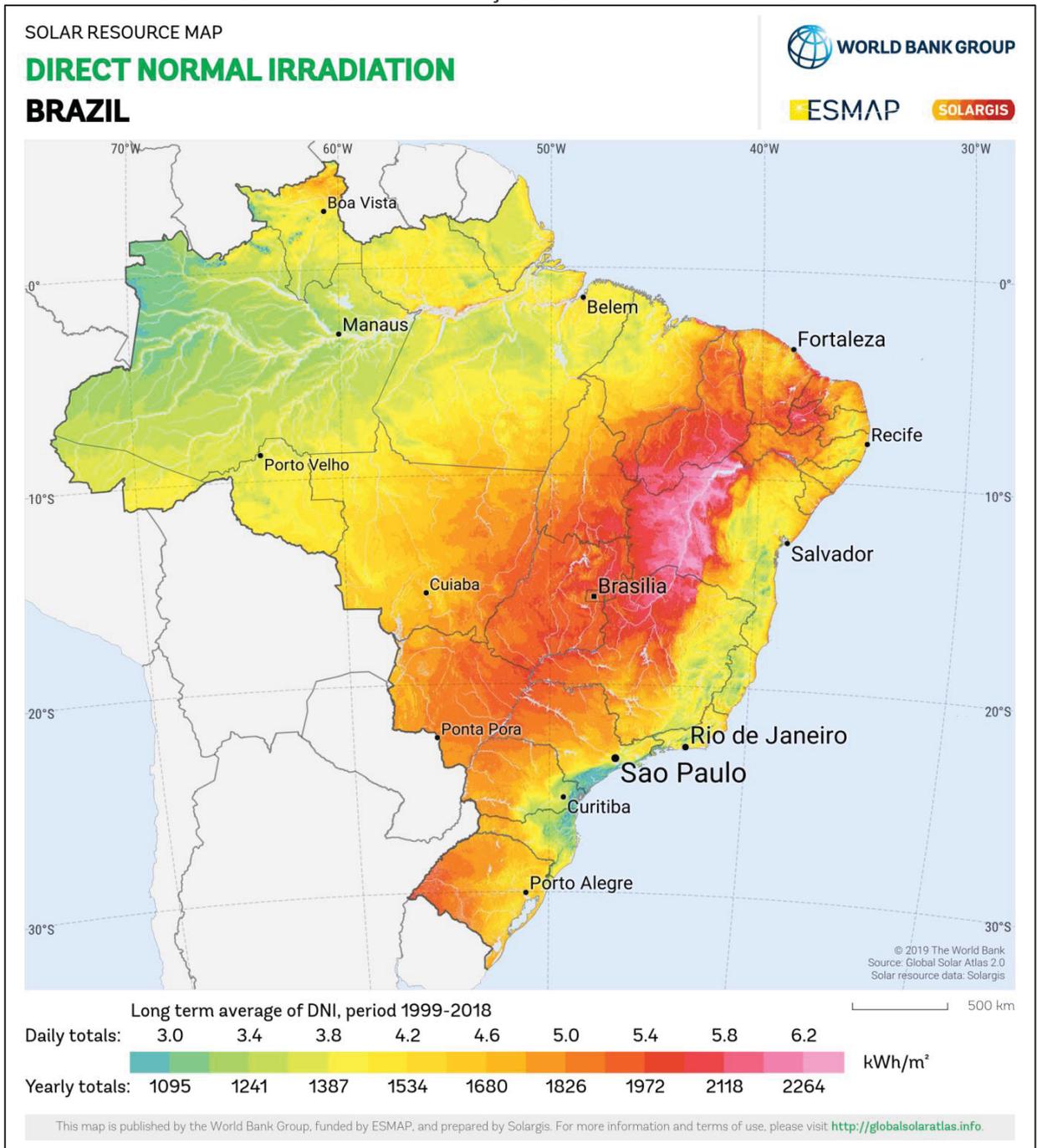
FIGURA 14 – ESQUEMATIZAÇÃO DO ÍNDICE DE IRRADIAÇÃO SOLAR DO SOLARGIS



Fonte: SOLARGIS(1) (2019).

Dentre os índices gerados pelo SolarGIS, é utilizada a Irradiação Solar Direta (*DNI*), componente de irradiância solar incidente do sol diretamente sobre a superfície terrestre, composto pela média anual de irradiância por hora e por metro quadrado ( $\text{Wh/m}^2/\text{ano}$ ), com amplitude de 1999 até 2018. A Figura 15, demonstra os índices de irradiação solar sobre o Brasil.

FIGURA 15 – ÍNDICE DE IRRADIAÇÃO SOLAR DIRETA PARA O BRASIL



Fonte: SOLARGIS(2) (2019)

### 3.2.2. Topografia

Para análise da topografia foi utilizada a declividade do terreno, calculada através do modelo digital de terreno (MDT) da área analisada. Os dados são advindos da *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)* com resolução de 90 metros, versão 4, obtidos pelo *Consortial for Spatial Geoinformation (CGIAR)*.

Com os modelos do *SRTM* de diferentes regiões e o software *QGIS*, foi elaborado um mosaico e calculado a declividade, obtendo os dados de declividade para o Brasil.

### 3.2.3. Rede de transmissão de energia elétrica

Para infraestrutura da rede de transmissão de energia elétrica foram obtidos dados geográficos das linhas de transmissão (com tensão acima de 115 kV), subestações e áreas urbanizadas (cidades ou arranjos populacionais com mais de 100 mil habitantes) visando o cálculo da proximidade de transmissão e consumo de energia. Os dados foram coletados pelo geoportal da Empresa de Pesquisa Energética (EPE).

### 3.2.4. Recursos Hídricos

Para avaliação dos recursos hídricos de todo o Brasil, verificou-se a disponibilidade hídrica conforme o balanço hídrico quantitativo realizado pelo Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) da Agência Nacional de Águas (ANA). O balanço hídrico é utilizado no diagnóstico das bacias brasileiras, sendo realizado por trecho de rio e por micro bacia, é a razão entre a vazão de retirada para os usos consuntivos e a disponibilidade hídrica.

Os dados utilizados estão classificados em cinco classes: excelente; confortável; preocupante; crítica; e muito crítica. As classes preocupante, crítica e muito crítica, são consideradas impróprias a retirada, as demais dispostas ao consumo.

### 3.2.5. Infraestrutura de transporte

Para infraestrutura de transportes foram obtidos os dados das rodovias federais e estaduais, ferrovias e estações, hidrovias e portos, assim como os aeroportos destinados a transporte de cargas. A fonte dos dados é o Banco de Infraestrutura de Transporte (BIT) do Ministério da Infraestrutura, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e a Infraero.

### 3.2.6. Uso e ocupação do solo

Na análise do uso e ocupação do solo, foram obtidos dados geoespaciais do estudo de Cobertura do Solo (2010-2014), realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Neste, o uso do solo é classificado em 14 características de ocupação, definidas no Anexo II – Classes de Cobertura e Uso da Terra (IBGE, 2018): Área Artificial; Área Agrícola; Pastagem plantada; Agropecuária com remanescentes florestais; Silvicultura; Vegetação Florestal; Vegetação Florestal com atividade agrícola; Vegetação Campestre; Área Úmida; Pastagem natural; Vegetação campestre com áreas agrícolas; Corpo d'água continental; Corpo d'água Costeiro; e Áreas Descobertas.

### 3.2.7. Meio ambiente e comunidades tradicionais

Na análise socioambiental foram obtidas as unidades de conservação de proteção integral e unidades de uso sustentável do Ministério do Meio Ambiente (MMA). Assim como reservas indígenas, comunidades quilombolas e assentamentos rurais advindas da Fundação Nacional do Índio (FUNAI) e Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA).

### 3.2.8. Restrições

Como áreas de restrição foram selecionadas as áreas urbanizadas e espelhos d'água, pelos dados do IBGE.

Para cada critério foi obtido o seu dado geoespacial a partir de repositórios digitais, geoportais e infraestruturas de dados espaciais governamentais. Em conjunto, obtiveram-se os metadados com informações descritivas. O Quadro 4 destaca os critérios e seus subcritérios, o órgão de obtenção, o Sistema Geodésico de Referência (SGR) e a projeção, quando projetado, e a resolução espacial ou escala numérica dos dados.

QUADRO 4 – BASE DE DADOS ESPACIAIS

Camada de informação	Subcritérios	Referência	SGR	Resolução espacial / Escala numérica
Irradiação	Irradiação <i>DNI</i>	SOLARGIS (2015)	WGS84	250m
Topografia do Terreno	Declividade (MDT)	CGIAR (2018)	WGS84	90m
Rede elétrica	Linhas de transmissão	EPE(2) (2019)	Sirgas 2000	1:250.000
	Subestação	EPE (2017)	Sirgas 2000	1:100.000
	Áreas urbanizadas	IBGE(2) (2015)	Sirgas 2000	1:50.000
Hidrografia	Disponibilidade hídrica	ANA (2013)	Sirgas 2000	1:1.000.000
Infraestrutura de transportes	Rodovias	DNIT (2019)	Sirgas 2000	1:250.000
	Ferrovias/Estações	MI (2017)	Sirgas 2000	1:250.000
	Aeroportos	Infraero (2010)	Sirgas 2000	1:250.000
	Hidrovias/Portos	MI (2017)	Sirgas 2000	1:250.000
Uso e ocupação do solo	Uso e ocupação do solo	IBGE (2018)	Sirgas 2000 (Albers-INDE)	1:250.000
Impacto ambiental	UC de proteção integral	MMA (2012)	SAD69	1:100.000
	UC de proteção de uso sustentável	MMA (2012)	SAD69	1:100.000
	Terras indígenas	FUNAI (2016)	Sirgas 2000	1:1.000.000
	Quilombolas	INCRA (2018)	Sirgas 2000	1:1.000.000
	Assentamentos Rurais	INCRA (2018)	Sirgas 2000	1:1.000.000
Demais restrições	Áreas urbanizadas	IBGE(2) (2015)	Sirgas 2000	1:50.000
	Espelhos d'água	ANA (2016)	Sirgas 2000	1:250.000
Limites territoriais	Federal, estadual e municipal	IBGE (2014)	Sirgas 2000	1:250.000

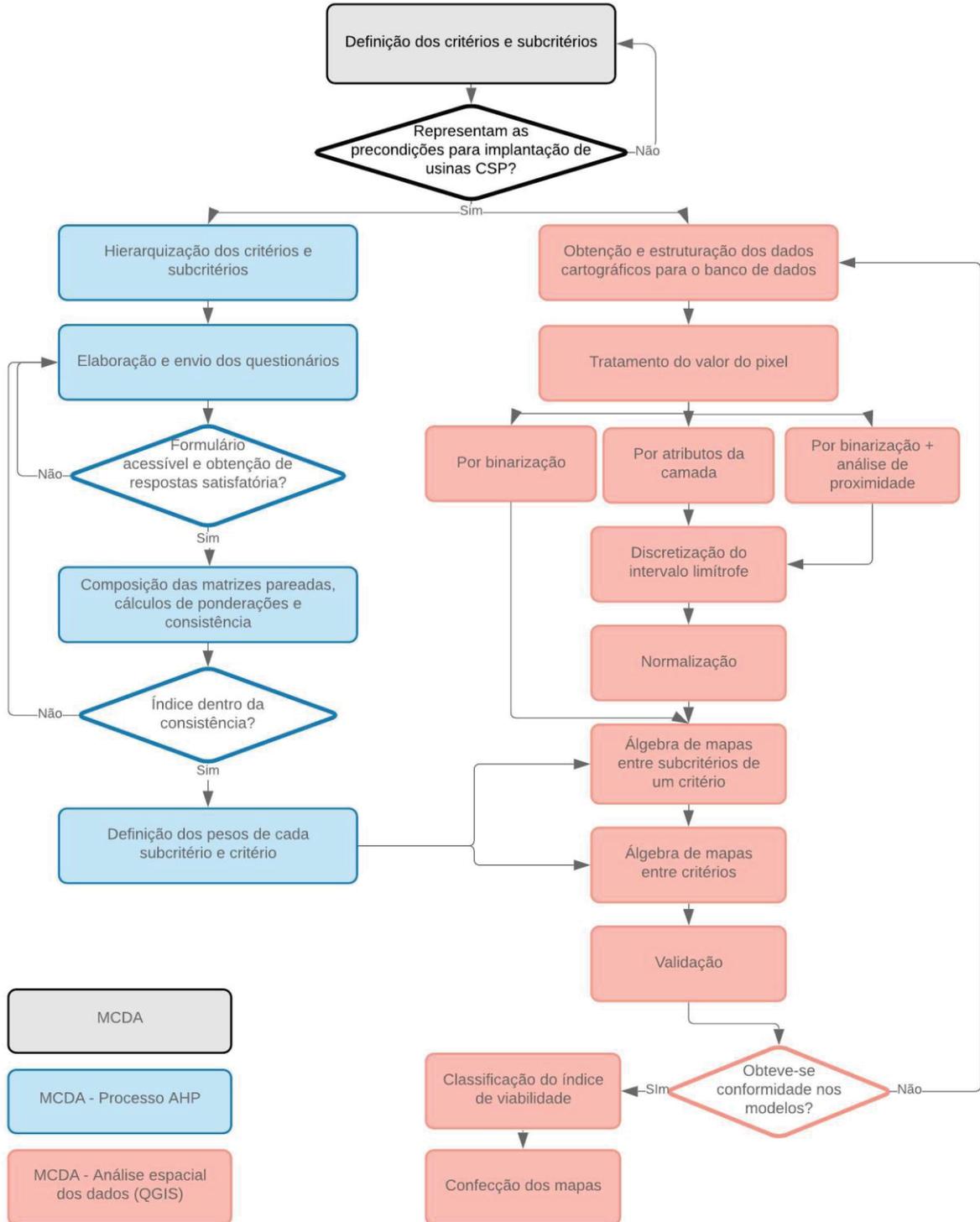
FONTE: O autor (2020).

### 3.3. SOFTWARE

As etapas de processamento dos dados geográficos foram aplicadas através do software QGIS 3.4 (QGIS, 2019), versão *Long Term Release*, em que foram utilizadas as bibliotecas que o compõe e as auxiliares: SAGA, GDAL e GRASS.

4 METODOLOGIA

FIGURA 16 – FLUXOGRAMA DE ETAPAS DA METODOLOGIA



FONTE: O autor (2020)

### 3.1. DEFINIÇÃO DE CRITÉRIOS

Os critérios foram selecionados pela sua justificativa e situação exigida à implantação da tecnologia *CSP*, conforme referenciais teóricos analisados. Os detalhes são exibidos no Quadro 5.

QUADRO 5 – SELEÇÃO DOS CRITÉRIOS POR JUSTIFICATIVA E SITUAÇÃO EXIGIDA

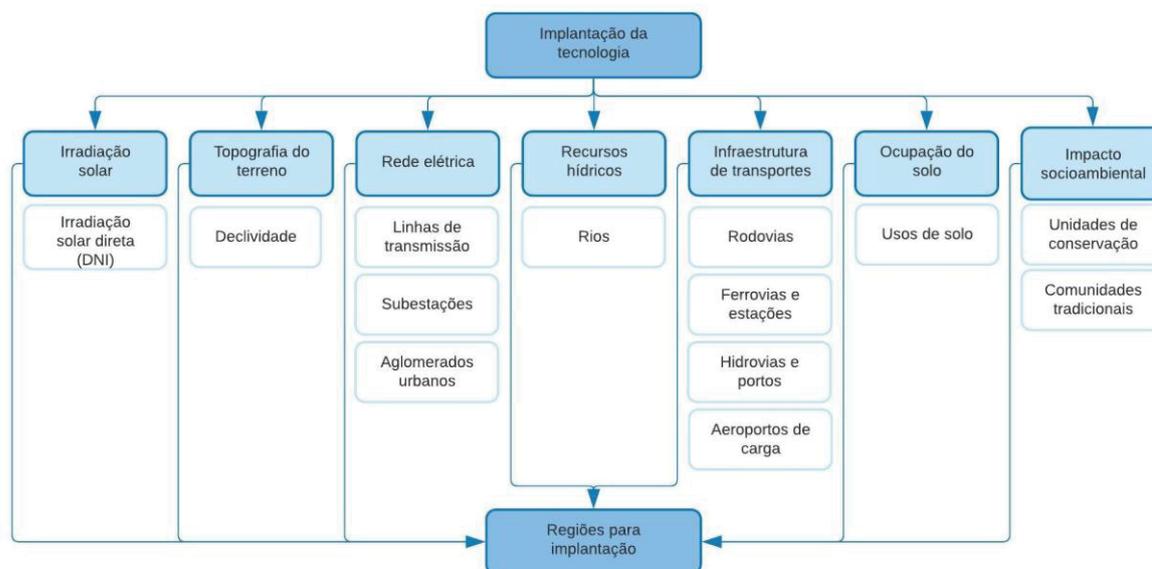
<b>Critério</b>	<b>Camada de informação</b>	<b>Justificativa</b>	<b>Situação exigida</b>
Qualidade da irradiação solar	<i>DNI</i>	A <i>DNI</i> é a pré-condição que define a eficiência energética das usinas <i>CSP</i>	Valores acima de 1785 kWh/m <sup>2</sup> /ano
Topografia	Declividade	A instalação dos CCP exige terrenos com baixo declive	Abaixo de 20% de declividade.
Rede de transmissão elétrica	Linhas de transmissão	A transmissão da energia gerada a rede de transmissão necessita de linhas de pelo menos 115kV	Até 15 km de distância
	Subestação	Transmissão por rede própria até subestação elevadora mais próxima	
	Áreas urbanizadas	Locais que demandam continuamente energia elétrica	
Recursos hídricos	Disponibilidade hídrica	A água é necessária no processo de resfriamento e geração de vapor no bloco de potência, assim como na lavagem dos espelhos	A disponibilidade hídrica da região está no índice Confortável ou acima.
Infraestrutura de transporte	Rodovias	As infraestruturas de transporte são utilizadas como meio de acesso de peças e pessoas as usinas, sua proximidade tende a permitir ou reduzir o traslado.	Até 15 km de distância
	Ferrovias		
	Hidrovias		
	Aeroportos		
Uso e ocupação do solo	Uso do solo	A definição do uso do solo define a função social da área analisada	Todas as áreas foram analisadas pelos especialistas no processo <i>AHP</i>
Meio ambiente	Unidades de conservação	Unidades de conservação são áreas de proteção ambiental, zeladas sob parâmetros legais jurídicos	As áreas foram definidas conforme permissibilidade jurídica
Comunidades	Tribos indígenas, Quilombolas e Assentamentos Rurais	Da mesma forma, as áreas destinadas a estas comunidades, são zeladas por parâmetros legais jurídicos	As áreas foram definidas conforme permissibilidade jurídica
Restrições	Áreas urbanizadas	Alto custo de desapropriação e danos visuais.	Não estar dentro de regiões urbanizadas
	Espelhos d'água	Impossibilita a construção	Não estar sobre espelhos d'água

FONTE: O autor (2020)

### 3.2. MCDA – AHP

A definição das ponderações e consistências foi realizada através do processo *AHP*. Com os critérios selecionados e discutidos, realizou-se a hierarquização *AHP* conforme Figura 17.

FIGURA 17 – HIERARQUIZAÇÃO *AHP*



FONTE: O autor (2020)

Na figura, são apresentados os níveis de hierarquização. O topo é composto pelo objetivo da implantação da usina *CSP*. Um nível abaixo, os critérios definem as precondições analisadas. Descendo um nível, têm-se os subcritérios que compõem cada critério; e por fim, a partir da análise do conjunto de critérios, é obtida a classificação das alternativas, que, neste caso, são as áreas da superfície terrestre analisadas nos dados cartográficos.

Na sequência foram criadas as matrizes de pareamento, compostas a partir de questionários submetidos a profissionais especializados na área da tecnologia *CSP* e em áreas correlatas, internos e externos ao projeto.

### 3.3. QUESTIONÁRIOS

O uso dos questionários foi idealizado visando simplificar a composição das matrizes de pareamento pelos profissionais colaboradores. A forma utilizada comumente é compor diretamente nas matrizes de pareamento, já neste estudo, foi

gerado um formulário contendo itens iniciais de compreensão da metodologia e auxílio ao preenchimento das perguntas, e na sequência, dispostos os quatro questionários de pareamento, utilizando botões de opção com os valores de importância da tabela Saaty para facilitar o preenchimento dos profissionais.

O modelo do formulário foi redigido na plataforma online e gratuita *Jotform* e está disponível online (<https://www.jotform.com/form-templates/questionario-ahp>). Composto por sete páginas, a 1ª com informações sobre o projeto, metodologia e instruções para preenchimento dos questionários, exibido na Figura 18 e Figura 19. Na 2ª página foram solicitados os dados de identificação do profissional colaborador, conforme Figura 20.

FIGURA 18 – FORMULÁRIO (INDICAÇÕES E INSTRUÇÕES DE PREENCHIMENTO – PARTE 1)

**lactec**  
INOVADORES POR NATUREZA

PÁGINA 1   PÁGINA 2   PÁGINA 3   PÁGINA 4   PÁGINA 5   PÁGINA 6

## Questionários Projeto Termossolar

A etapa 10 do projeto Termossolar compreende a "Descrição de locais geográficos mais adequados à instalação da tecnologia desenvolvida de Usinas Heliotérmicas CSP por Coletores Cilindro-parabólicos", tendo como objetivo determinar a viabilidade da implantação da tecnologia em diferentes regiões do Brasil. A metodologia utilizada pelo setor de Geossoluções do Lactec, será a de análise multicritério geoespacial, em que serão determinadas precondições locais, ponderadas a partir do Processo de Análise Hierárquica (AHP) e de questionários a serem respondidos por profissionais com conhecimento básico no tema ou em áreas correlacionadas.

### Como funciona a metodologia AHP

A AHP consiste na ponderação de critérios para determinação de melhores alternativas à ocorrência de um objetivo. Nesta etapa, o **objetivo** é a implantação da usina termossolar, os **critérios** são as precondições físicas, e as **alternativas** são os locais geográficos das diferentes regiões do Brasil. Desta forma, aos critérios e subcritérios serão elencadas ponderações através de questionários que determinarão a importância de cada critério para a implantação e funcionamento da tecnologia. Posteriormente, os critérios ponderados serão analisados nas alternativas e então, determinados os locais com viabilidade ao projeto.

### Instruções para preenchimento dos questionários

Foram criados 4 questionários, com o preenchimento a partir de duas etapas:

a) Ao lado esquerdo do questionário deve ser selecionado o critério de maior importância para implantação e funcionamento da usina, entre os dois listados na linha. No exemplo abaixo, foi selecionado o "Nível de irradiância solar DNI" como mais importante que a "Topografia do terreno".

FONTE: O autor (2020)

FIGURA 19 – FORMULÁRIO (INDICAÇÕES E INSTRUÇÕES DE PREENCHIMENTO – PARTE 2)

**Instruções para preenchimento dos questionários**

Foram criados 4 questionários, com o preenchimento a partir de duas etapas:

a) Ao lado esquerdo do questionário deve ser selecionado o critério de maior importância para implantação e funcionamento da usina, entre os dois listados na linha. No exemplo abaixo, foi selecionado o "Nível de irradiação solar DNI" como mais importante que a "Topografia do terreno".

Qual o critério mais importante? Quão maior é a importância do critério selecionado?

Nível de irradiação solar DNI  Topografia do terreno  1  2  3  4  5  6  7  8  9

b) Em seguida, ao lado direito, deve ser selecionado quão maior é o grau de importância do critério selecionado em relação ao outro, no intervalo de 1 a 9, conforme indicadores de importância informados na tabela Saaty.

Qual o critério mais importante? Quão maior é a importância do critério selecionado?

Nível de irradiação solar DNI  Topografia do terreno  1  2  3  4  5  6  7  8  9

A tabela Saaty é composta por indicadores de importância, variando de 1 (igualdade de importância) até 9 (importância absoluta).

Grau	Indicador	Característica
1	Igual importância	Os dois critérios contribuem igualmente ao objetivo.
3	Importância fraca	O critério é levemente mais considerável.
5	Importância forte	O critério é mais decisivo que o relacionado
7	Importância muito forte	O critério é dominante em relação ao outro.
9	Importância absoluta	O critério se sobressai de forma absoluta ao relacionado.
2,4,6,8	Valores intermediários	Valores de importância intermediários aos demais.

Os questionários devem ser preenchidos conforme seu entendimento quanto à tecnologia a ser instalada.

FONTE: O autor (2020)

FIGURA 20 – FORMULÁRIO (IDENTIFICAÇÃO DO PROFISSIONAL)

PÁGINA 1
PÁGINA 2
PÁGINA 3
PÁGINA 4
PÁGINA 5
PÁGINA 6

**Identificação profissional:**

**Nome**

Nome próprio
  
Sobrenome

**E-mail**

  
example@example.com

**Área de atuação profissional**

  
Área que atua no projeto ou como profissional

FONTE: O autor (2020)

Da página 3 a 6 foram dispostos os questionários. Por meio de botões de seleção, ao lado esquerdo foi selecionado o critério mais importante conforme pareamento, enquanto ao lado direito foi definido o grau de importância segunda a tabela Saaty, apresentados na Figura 21, Figura 22, Figura 23 e Figura 24. Ao fim, concluindo o questionário, foi exibida a página de agradecimento, seguido do envio de um e-mail ao participante com a confirmação de sua participação.

FIGURA 21 – FORMULÁRIO (QUESTIONÁRIO 1)

PÁGINA 1	PÁGINA 2	PÁGINA 3	PÁGINA 4	PÁGINA 5	PÁGINA 6
<b>Questionário 1 - Proximidade à rede elétrica</b>					
<b>Qual o critério mais importante?</b>			<b>Quão maior é a importância do critério selecionado?</b>		
<input type="radio"/> Prox. à linha de transmissão	<input type="radio"/> Proximidade à subestação	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4
<input type="radio"/> Prox. à linha de transmissão	<input type="radio"/> Prox. à aglomerados urbanos	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4
<input type="radio"/> Prox. à subestação	<input type="radio"/> Prox. à aglomerados urbanos	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4

FONTE: O autor (2020)

FIGURA 22 – FORMULÁRIO (QUESTIONÁRIO 2)

PÁGINA 1	PÁGINA 2	PÁGINA 3	PÁGINA 4	PÁGINA 5	PÁGINA 6
<b>Questionário 2 - Proximidade à infraestrutura de transporte</b>					
<b>Qual o critério mais importante?</b>			<b>Quão maior é a importância do critério selecionado?</b>		
<input type="radio"/> Proximidade à rodovia	<input type="radio"/> Proximidade à ferrovia	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4
<input type="radio"/> Proximidade à rodovia	<input type="radio"/> Proximidade à hidrovia	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4
<input type="radio"/> Proximidade à rodovia	<input type="radio"/> Prox. à aeroportos de carga	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4
<input type="radio"/> Proximidade à ferrovia	<input type="radio"/> Proximidade à hidrovia	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4
<input type="radio"/> Proximidade à ferrovia	<input type="radio"/> Prox. à aeroportos de carga	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4
<input type="radio"/> Proximidade à hidrovia	<input type="radio"/> Prox. à aeroportos de carga	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4

FONTE: O autor (2020)

FIGURA 23 – FORMULÁRIO (QUESTIONÁRIO 3)

PÁGINA 1	PÁGINA 2	PÁGINA 3	PÁGINA 4	PÁGINA 5	PÁGINA 6					
<b>Questionário 3 - Uso e ocupação do solo</b>										
<b>Qual o critério mais importante?</b>			<b>Quão maior é a importância do critério selecionado?</b>							
<input type="radio"/> Áreas descobertas	<input type="radio"/> Pastagem	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6	<input type="radio"/> 7	<input type="radio"/> 8	<input type="radio"/> 9
<input type="radio"/> Áreas descobertas	<input type="radio"/> Agricultura	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6	<input type="radio"/> 7	<input type="radio"/> 8	<input type="radio"/> 9
<input type="radio"/> Áreas descobertas	<input type="radio"/> Vegetação campestre	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6	<input type="radio"/> 7	<input type="radio"/> 8	<input type="radio"/> 9
<input type="radio"/> Áreas descobertas	<input type="radio"/> Vegetação florestal	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6	<input type="radio"/> 7	<input type="radio"/> 8	<input type="radio"/> 9
<input type="radio"/> Pastagem	<input type="radio"/> Agricultura	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6	<input type="radio"/> 7	<input type="radio"/> 8	<input type="radio"/> 9
<input type="radio"/> Pastagem	<input type="radio"/> Vegetação campestre	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6	<input type="radio"/> 7	<input type="radio"/> 8	<input type="radio"/> 9
<input type="radio"/> Pastagem	<input type="radio"/> Vegetação florestal	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6	<input type="radio"/> 7	<input type="radio"/> 8	<input type="radio"/> 9
<input type="radio"/> Agricultura	<input type="radio"/> Vegetação campestre	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6	<input type="radio"/> 7	<input type="radio"/> 8	<input type="radio"/> 9
<input type="radio"/> Agricultura	<input type="radio"/> Vegetação florestal	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6	<input type="radio"/> 7	<input type="radio"/> 8	<input type="radio"/> 9
<input type="radio"/> Vegetação campestre	<input type="radio"/> Vegetação florestal	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6	<input type="radio"/> 7	<input type="radio"/> 8	<input type="radio"/> 9

FONTE: O autor (2020)

FIGURA 24 – FORMULÁRIO (QUESTIONÁRIO 4)

PÁGINA 1	PÁGINA 2	PÁGINA 3	PÁGINA 4	PÁGINA 5	PÁGINA 6
<b>Questionário 4 - Ponderação dos critérios</b>					
<b>Qual o critério mais importante?</b>			<b>Quão maior é a importância do critério selecionado?</b>		
<input type="radio"/> Nível de irradiância DNI	<input type="radio"/> Topografia do terreno	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4
<input type="radio"/> Nível de irradiância DNI	<input type="radio"/> Proximidade à rede elétrica	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4
<input type="radio"/> Nível de irradiância DNI	<input type="radio"/> Proximidade à recursos hídricos	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4
<input type="radio"/> Nível de irradiância DNI	<input type="radio"/> Prox. à infra. transportes	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4
<input type="radio"/> Nível de irradiância DNI	<input type="radio"/> Uso e ocupação do solo	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4
<input type="radio"/> Topografia do terreno	<input type="radio"/> Proximidade à rede elétrica	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4
<input type="radio"/> Topografia do terreno	<input type="radio"/> Proximidade à recursos hídricos	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4
<input type="radio"/> Topografia do terreno	<input type="radio"/> Prox. à infraest. de transportes	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4
<input type="radio"/> Topografia do terreno	<input type="radio"/> Uso e ocupação do solo	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4
<input type="radio"/> Proximidade à rede elétrica	<input type="radio"/> Proximidade à recursos hídricos	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4
<input type="radio"/> Proximidade à rede elétrica	<input type="radio"/> Prox. à infraest. de transportes	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4
<input type="radio"/> Proximidade à rede elétrica	<input type="radio"/> Uso e ocupação do solo	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4
<input type="radio"/> Proximidade à recursos hídricos	<input type="radio"/> Prox. à infraest. de transportes	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4
<input type="radio"/> Proximidade à recursos hídricos	<input type="radio"/> Uso e ocupação do solo	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4
<input type="radio"/> Prox. à infraest. de transportes	<input type="radio"/> Uso e ocupação do solo	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4

FONTE: O autor (2020)

#### 4.3.1. Quantidade de participações

Inicialmente, o formulário online foi enviado para uma amostra de profissionais, como fase de teste e verificação. Realizadas as modificações, a quantidade de especialistas foi ampliada, definido pela equação (1), em que é definida pela maior ordem entre as matrizes, no caso do quarto questionário, matriz de ordem 6. A equação (7) determina o número ideal de participantes 'R' igual a 15.

$$R = n(n - 1)/2 \quad (7)$$

$$R = 6(6 - 1)/2$$

$$R = 15$$

#### 4.3.2. Equações de ponderação

Os valores dos formulários selecionados foram transcritos em planilhas do *Microsoft Excel*. Nas planilhas foi verificado o preenchimento, definidas as matrizes pareadas, e calculadas a consistência e a ponderação dos critérios através de equações e ferramentas do software.

Para composição das matrizes, foram inseridos os valores obtidos em cada pergunta com sua respectiva posição na matriz, por exemplo: No formulário 10, questionário 1, a primeira pergunta refere-se a comparação entre a 'proximidade às linhas de transmissão' e a 'proximidade às subestações', em que a 'proximidade às linhas de transmissão' foi definida como de maior importância, com o indicador grau 2 (levemente mais considerável), na posição  $A_{1,2}$  na Matriz A (Quadro 6). O mesmo foi feito com as demais comparações, das posições  $A_{1,3}$  e  $A_{2,3}$ , sendo a diagonal composta por 1 e o restante da matriz espelhada ao inverso dos valores da parte superior da matriz.

QUADRO 6 – MATRIZ A (COMPOSIÇÃO)

<b>A – Matriz critérios</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>
Proximidade às Linhas de transmissão	1	2	5
Proximidade às subestações	0,5	1	6
Proximidade aos aglomerados urbanos	0,2	0,166667	1
Total	1,70	3,1667	12,0

FONTE: O autor (2020)

Para o cálculo da ponderação dos subcritérios a matriz A foi normalizada pela divisão de cada valor das células com a somatória de cada coluna (equação 8), gerando os pesos relativos dos critérios conforme destacado em vermelho no Quadro 7. Em seguida, o autovetor foi dado pela média dos pesos relativos, matriz 'B', de cada comparação, destacado em verde. Estes valores representam a ponderação para cada critério.

$$\text{Pesos relativos}_{ij} = A_{ij} / (\sum_i^n A_{ij}) \quad (8)$$

Já o cálculo do índice de consistência (IC) teve como base o autovalor destacado em alaranjado no Quadro 7, calculado pelo somatório do produto de cada elemento do autovetor pelo somatório da respectiva coluna da matriz de comparação 'A' (equação 9).

$$\text{Autovalor}_i = \sum_i^n (\text{Autovetor}_i * \sum_j^n A_{ij}) \quad (9)$$

QUADRO 7 – MATRIZ A (VALORES DE PONDERAÇÕES)

B – Matriz de pesos relativos	C1	C2	C3	Autovetor (ponderações)	Média autovetor	Autovalor
C1	0.5882	0.6315	0.4167	0.545494	0.1818	3.1313
C2	0.2941	0.3157	0.5	0.369969	0.1233	3.1082
C3	0.1176	0.0526	0.0833	0.084537	0.0282	3.0199

FONTE: O autor (2020)

A equação (10) determinou o valor de IC pela média dos autovalores subtraído do número de critérios, dividido pelo número de critérios subtraído por 1.

$$IC = ((\sum_i^n (\text{Autovalor}_i) / n) - n^o \text{ de critérios}) / (n^o \text{ de critérios} - 1) \quad (10)$$

$$IC = (3.0864 - 3) / (3 - 1)$$

$$IC = 0.043$$

Definido o IC, a razão de consistência (RC) foi obtida pela equação (11) da razão entre a IC e o índice de aleatoriedade (IA), índice tabelado conforme número de critérios. Indicados no Quadro 8.

$$RC = IC/IA \quad (11)$$

$$RC = 3.1313/0.58$$

$$RC = 0.074$$

QUADRO 8 – MATRIZ A (VALORES DE CONSISTÊNCIA)

IC	IA	RC – Razão da consistência
0.043	0.58	0.074

FONTE: O autor (2020)

#### 4.4. PROCESSAMENTO DOS DADOS CARTOGRÁFICOS

##### 4.4.1. Coleta de dados cartográficos

Os dados foram coletados de fontes confiáveis, como geoportais e infraestruturas de dados de órgãos governamentais, analisados quanto os seus metadados, e assim selecionados para base de dados.

##### 4.4.2. Sistema geodésico de referência e projeção cartográfica

Os dados obtidos foram padronizados ao sistema geodésico de referência SIRGAS 2000 e projetados na projeção Policônica com meridiano central a 54° Oeste (-54°), parâmetros oficiais do IBGE, responsável pela cartografia no Brasil (IBGE(1), 2015).

A projeção dos dados é essencial para possibilitar cálculos métricos no plano, já que consiste na transformação da componente espacial tridimensional em bidimensional. Esta transformação acarreta em distorções, sendo esta projeção Policônica, que preserva características de equivalência e conformidade próximas ao meridiano central, contendo distorções ao se distanciar deste.

##### 4.4.3. Definição da escala e resolução espacial dos dados

Os dados geoespaciais foram obtidos com diferentes escalas numéricas e resoluções espaciais. Para torna-los interoperáveis foi necessário padronizá-los em uma escala numérica e resolução espacial em comum.

Para representação dos produtos visando à análise macro das regiões de estudo e conforme a menor escala entre os dados obtidos, de 1:1.000.000, foi definida como escala numérica mínima de representação a escala de 1:1.000.000.

A padronização da resolução espacial foi realizada durante o processo de rasterização. Neste, o tamanho do pixel foi determinado a partir de testes, visando o menor tamanho de pixel para satisfazer a generalização das feições e evitar problemas de extrapolação à escala de representação. Foram realizados testes com a resolução inicial de 1000 metros quadrados, na qual foram detectadas extrapolações que afetaram os produtos. No segundo teste, de 90 metros quadrados, a representação satisfaz a escala, porém o custo computacional foi alto, sendo determinado o teste com a resolução de 180 metros quadrados, que satisfaz a representação do produto e o custo computacional.

#### 4.4.4. Adequação dos dados em Raster (Rasterização)

No processo de rasterização, os dados projetados e em estrutura vetorial foram transformados para estrutura raster. Este procedimento impõe que os dados antes estruturados por pontos, sejam definidos por células, em matrizes. Nesta estrutura, cada célula é considerada um pixel que representa um valor de interesse e possui um tamanho determinado.

Com o tamanho do pixel de 180 metros quadrados, o valor do pixel foi determinado por três formas de tratamento, conforme a precondição a ser representada:

- Pela seleção do valor na tabela de atributos do dado geográfico, por exemplo: O valor de pixel para irradiação solar foi coletado no atributo de média anual do atributo do dado de Irradiação solar. Neste formato foram tratadas as camadas de Irradiação Solar, Declividade, Uso do solo, Disponibilidade hídrica;
- Por binarização, na análise da ocorrência da feição na célula. Quando a feição ocorreu na célula foi determinada como verdadeira (valor do pixel 1), caso contrário, falsa (valor do pixel 0). Este formato foi usado às camadas restritivas;
- Binarização com análise de proximidade de cada pixel em relação aos pixels marcados como verdadeiros (pixel com valor 1) da camada. Para o cálculo de

proximidade foi utilizado a distância de Manhattan, que define a distância entre dois pontos como a soma das diferenças absolutas entre as suas coordenadas. Utilizado nas precondições de linhas de transmissão, subestações, aglomerados urbanos, rodovias, ferrovias, hidrovias e aeroportos.

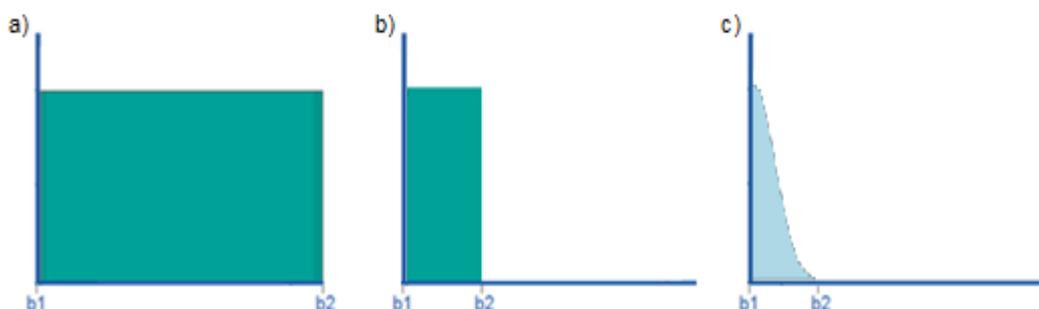
#### 4.4.5. Padronização dos valores dos dados

Na padronização das camadas, todas as camadas com variáveis com intervalos variados, foram padronizadas com intuito de possibilitar a interoperabilidade dos dados, estes foram dispostos no intervalo de 0 a 1. Para tal, foram utilizadas as seguintes etapas:

- Discretização de intervalos limítrofes das camadas para controle de valores que corroboram a implantação das usinas;
- Aplicação da lógica difusa nos valores das camadas.

As etapas de padronização estão representadas graficamente na Figura 25, na qual as camadas na estrutura raster possuem intervalos definidos (a), com isso, as camadas são discretizadas em intervalos de controle (b), e então é aplicada a lógica difusa pela função sigmoide decrescente (c) ou crescente.

FIGURA 25 – RECLASSIFICAÇÃO DOS DADOS PELA DISCRETIZAÇÃO E LÓGICA DIFUSA



FONTE: O autor (2020)

Para a definição dos intervalos limítrofes de controle de cada plano de informação, foi analisado o referencial teórico abordado no tópico de Estado da Arte. Neste, foi possível identificar particularidades dos intervalos dos dados nos demais estudos para aplicação de intervalos similares visando resultados consistentes. Os intervalos foram determinados conforme os critérios, sendo iguais para seus

subcritérios, visto que, diferentes intervalos podem influenciar na ponderação dos subcritérios. No Quadro 9, são apresentados os intervalos para discretização das camadas.

QUADRO 9 – INTERVALOS LIMÍTROFES DOS SUBCRITÉRIOS

Camada de informação	Subcritérios	Intervalos limítrofes
Irradiação solar	<i>DNI</i>	< 1785 kWh/m <sup>2</sup> /ano
		> 1785 kWh/m <sup>2</sup> /ano
Topografia	Declividade	0 – 20°
		> 20°
Rede elétrica	Linhas de transmissão, Subestações, Áreas urbanizadas	0 – 15 km
		>15 km
Infraestrutura de transporte	Rodovias, Ferrovias, Hidrovias, Aeroportos de carga	0 – 15 km
		>15 km

FONTE: O autor (2020)

Já para o uso e ocupação do solo e recursos hídricos, foram utilizados classificadores agregando áreas semelhantes. Para o uso do solo, os 14 grupos foram agregados por similaridade em 6 grupos, 5 classificatórios e 1 restritivo, apresentados no Quadro 10. Este procedimento foi feito para facilitar a análise do mesmo critério via questionários com um menor número de comparações e correlações entre os subcritérios.

QUADRO 10 – INTERVALOS DE CLASSIFICAÇÃO DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

Camada de informação	Classe dos subcritérios	Intervalo de classificação	Novas classes
Uso e ocupação do solo	Áreas Descobertas	1	Área descoberta
	Pastagem natural	2	Pastagem
	Pastagem plantada	2	
	Área Agrícola	3	Agricultura
	Vegetação Campestre	4	Vegetação campestre
	Vegetação campestre com áreas agrícolas	4	
	Vegetação Florestal	5	Vegetação florestal
	Vegetação Florestal com atividade agrícola	5	
	Silvicultura	5	
	Agropecuária com remanescentes florestais	5	
	Área Artificial (construções)	Restritivo	Restritiva
	Corpo d'água continental	Restritivo	
	Corpo d'água Costeiro	Restritivo	
	Área Úmida	Restritivo	

FONTE: O autor (2020)

As definições das novas classes baseiam-se na classificação do IBGE (IBGE, 2018), descritas no Quadro 11.

QUADRO 11 – INTERVALOS DE CLASSIFICAÇÃO DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

Novas classes	Definições
Área descoberta	Áreas que predominam superfícies estruturadas por edificações e sistemas antrópicos não-agrícolas
Pastagem	Áreas destinadas ao pastoreio do gado e outros animais com vegetação cultivada ou natural
Agricultura	Áreas caracterizadas por lavouras temporárias, semi-perenes e permanentes, irrigadas ou não, sendo a terra utilizada para a produção de alimentos, fibras e commodities do agronegócio.
Vegetação baixa	Áreas caracterizadas por formações campestres e ou predominantemente campestre. Entendem-se como campestres as diferentes categorias de vegetação fisionomicamente diversas da florestal, ou seja, aquelas que se caracterizam por um estrato predominantemente arbustivo, esparsamente distribuído sobre um estrato gramíneo-lenhoso.
Vegetação densa/alta	Áreas ocupadas por florestas ou predominantemente com porte florestal. Consideram-se florestais as formações arbóreas com porte superior a 5 metros de altura.
Restritiva	Áreas artificiais (construções), Corpos d'água continental e costeiro, Áreas úmidas.

FONTE: O autor (2020)

Para os recursos hídricos têm-se os valores, conforme Quadro 12.

QUADRO 12 – INTERVALOS DE CLASSIFICAÇÃO DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA

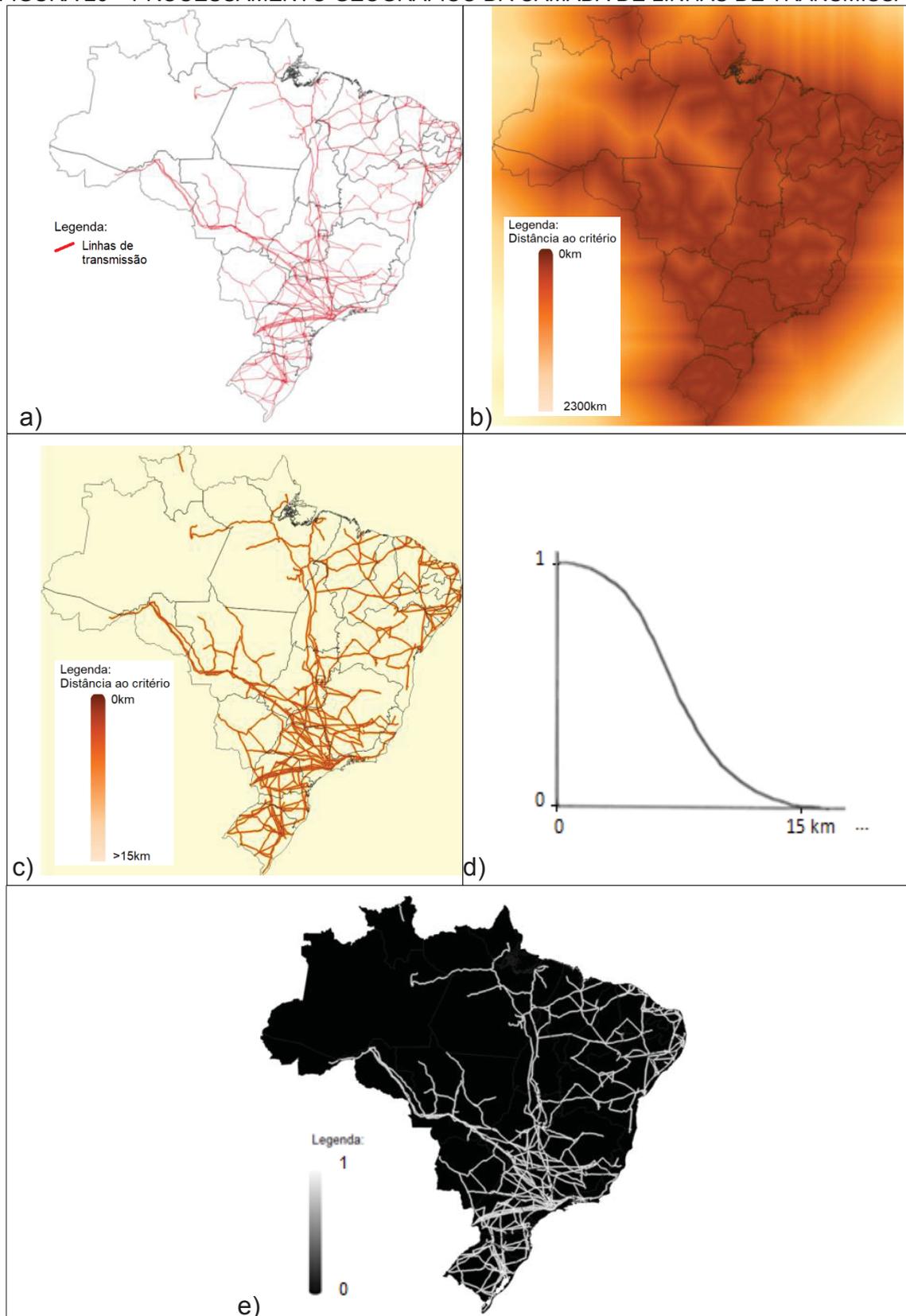
Camada de informação	Subcritérios	Intervalo de classificação
Recursos hídricos	Disponibilidade hídrica	Excelente (5)
		Confortável (4)
		Preocupante (3)
		Crítica (2)
		Muito Crítica (1)

FONTE: O autor (2020)

A Figura 26 apresenta as etapas de processamento aplicadas ao subcritério de linhas de transmissão:

- Projeção e rasterização dos dados geográficos do subcritério de linhas de transmissão;
- Cálculo dos pixels de proximidade dos subcritérios pela distância Manhattan;
- Discretização dos intervalos de 0 a 15 km;
- Padronização por lógica difusa, equação sigmoidal decrescente aos intervalos de 0 a 1;
- Modelo resultante para o subcritério.

FIGURA 26 – PROCESSAMENTO GEOGRÁFICO DA CAMADA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO



FONTE: O autor (2020)

Por outro lado, as camadas restritivas foram separadas em parcialmente restritivas e totalmente restritivas. No Quadro 13, são demonstrados os critérios da camada de meio ambiente segundo classificação de permissibilidade jurídica de projetos desenvolvidos anteriormente pela equipe de Meio Ambiente do LACTEC, e duas camadas restritivas de uso e ocupação do solo.

QUADRO 13 – CLASSIFICAÇÃO DE SUBCRITÉRIOS RESTRITIVOS

Camada de informação	Subcritérios	Restrição	Permissibilidade	Valor de classificação
Meio ambiente	Unidades de conservação de proteção integral	Total	Necessitam de determinação constitucional de projeto de lei aprovado pelo congresso, assembleias legislativas ou câmaras municipais	0
Comunidades tradicionais	Terras indígenas			
Meio ambiente	Unidades de conservação de proteção de uso sustentável	Parcial	Necessitam de autorizações e permissões além das ambientais	0.3
Comunidades tradicionais	Quilombolas Assentamentos Rurais			
Ocupação do solo	Área urbanizadas	Total		0
	Corpo d'água	Total		

FONTE: Lactec (2020).

As camadas totalmente restritivas foram ponderadas com o valor 0, logo, anulam os demais critérios no modelo final. Já os dados parcialmente restritivos, foram ponderados em 0,3, reduzindo a viabilidade quando inseridos no modelo final.

#### 4.4.6. Álgebra de mapas

Com os subcritérios compostos em camadas de informação padronizadas, foram realizadas duas etapas de álgebra de mapas a partir do método CLP:

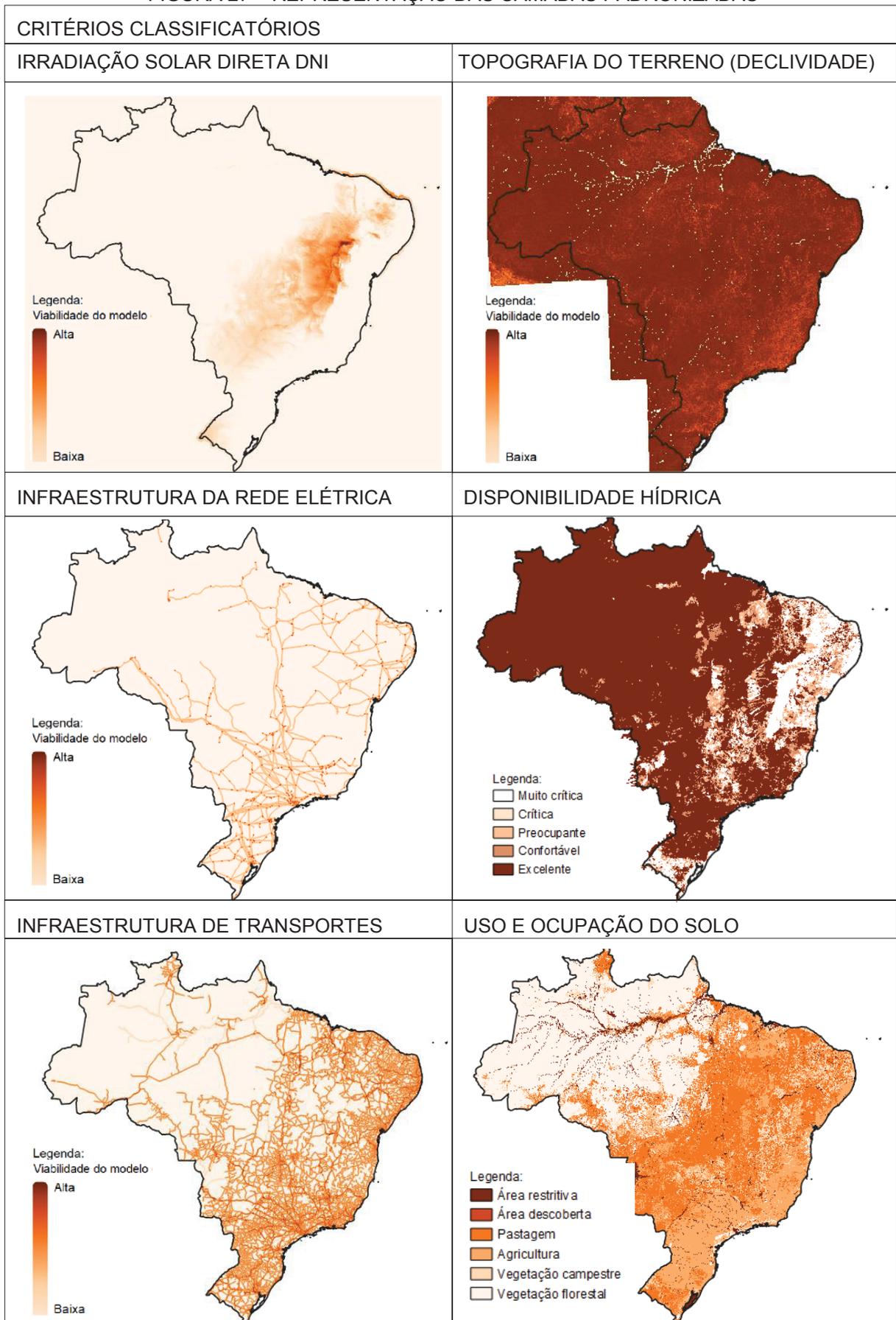
- Aplicação do CLP nos subcritérios pertencentes ao mesmo critério;
- Aplicação do CLP entre os critérios para composição do modelo de viabilidade.

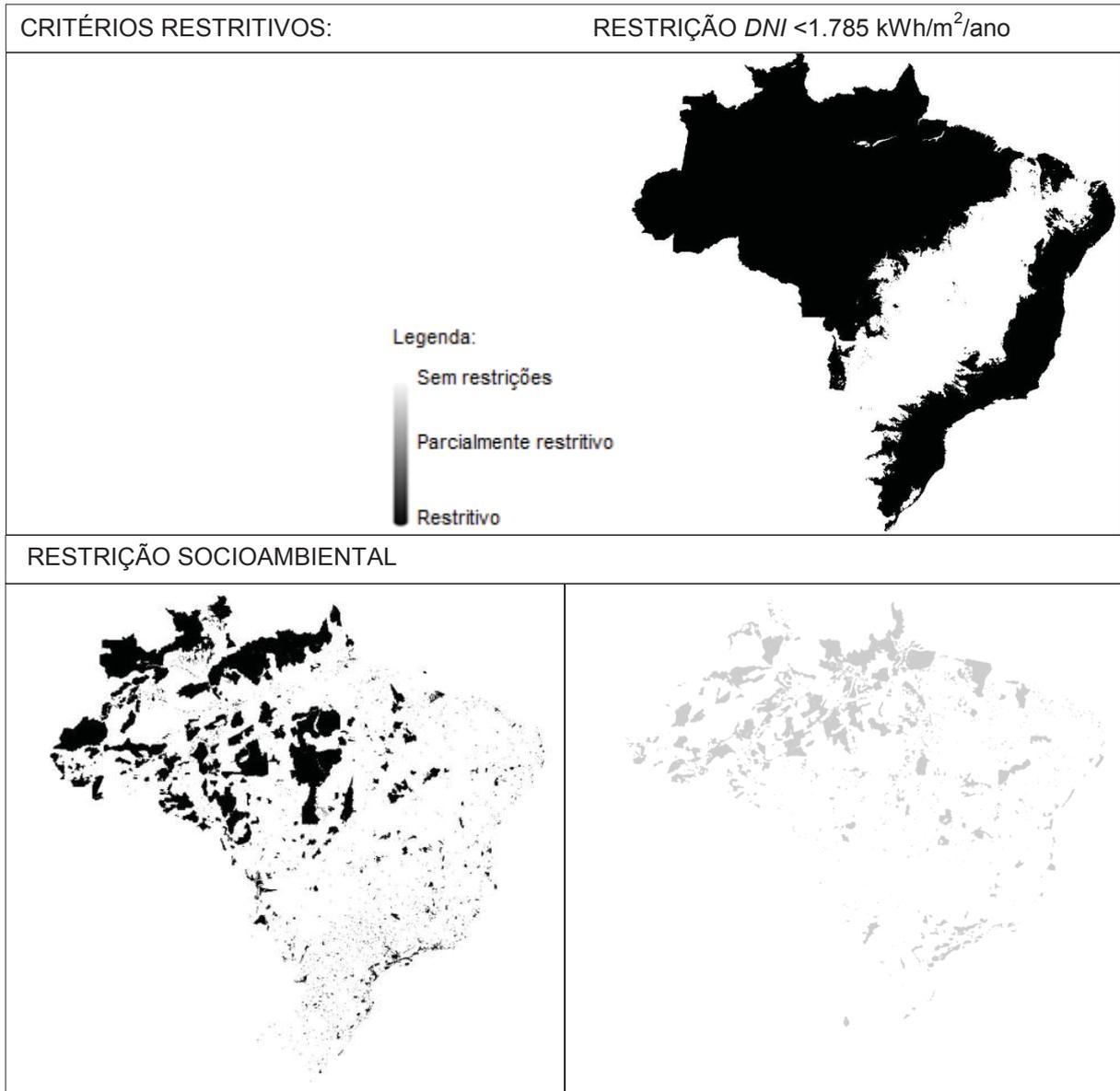
A aplicação do CLP aos subcritérios foi através da equação (12), adaptada às ferramentas do software QGIS. A resultante é dada pela somatória da multiplicação da camada de informação do subcritério ao seu peso, determinado pela ponderação através do processo *AHP*.

$$\text{Modelo critério}_i = \sum_i^n (\text{Camada de informação do subcritério}_i * \text{Peso do subcritério}_i) \quad (12)$$

Na Figura 27, são representadas as camadas dos critérios processadas e padronizadas, separadas em critérios classificatórios e critérios restritivos.

FIGURA 27 – REPRESENTAÇÃO DAS CAMADAS PADRONIZADAS





Fonte: O autor (2020)

Com a obtenção das camadas, a aplicação do CLP entre critérios consistiu na aplicação da equação (13), em que resulta da somatória da multiplicação de cada camada com seu respectivo peso, advindo da metodologia AHP, sendo, por fim, multiplicada pela camada de critérios restritivos, compondo o modelo de viabilidade.

$$\text{Modelo viabilidade} = \left( \sum_i^n (\text{Camada do critério}_i * \text{Peso do critério}_i) \right) * \text{Restrições} \quad (13)$$

#### 4.5. VALIDAÇÃO DOS MODELOS GERADOS

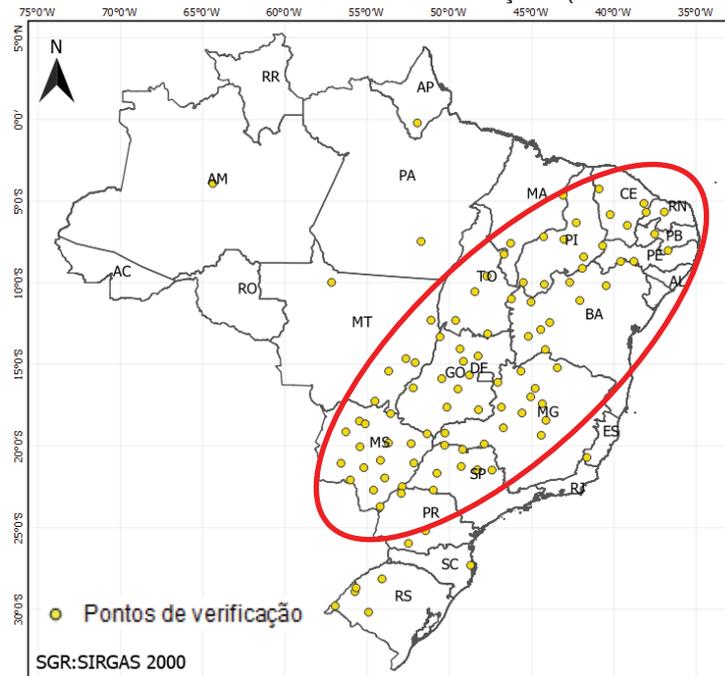
A validação pode ser dividida em 2 formas de avaliação: Das ponderações do processamento *AHP* validados a partir da razão de consistência (RC), apresentada nos tópicos anteriores; Do processamento dos dados geoespaciais e do modelo final, apresentados no tópico seguinte.

##### 4.5.1. Validação dos dados geoespaciais modelados

Para os dados geoespaciais modelados e ao modelo final, a validação foi baseada na avaliação de qualidade de dados contida no manual técnico do IBGE (IBGE, 2017) e na norma ET-CQDG (DCT/DSG, 2016). A categoria de qualidade utilizada foi a de acurácia temática, pelo subelemento de acurácia da classificação, que consiste na interpretação e comparação das feições das classes ou atributos do conjunto de dados modelados com dados externos ao trabalho que descrevem a realidade.

Para a validação foram coletadas 100 amostras no modelo, sendo que cada amostra contém 5 itens de validação, totalizando 500 itens amostrais definidos abaixo. Dos 100 pontos amostrais, 80 foram por amostragem aleatória simples nas áreas com viabilidade positiva (indicado pelo círculo vermelho na Figura 28), e 20 definidas manualmente em locais de escolha do autor (inseridas em locais com e sem viabilidade, sendo uma na cidade de Rosana – São Paulo, local de implantação da usina *CSP* da CESP).

FIGURA 28 – AMOSTRAGEM DE VALIDAÇÃO (EM AMARELO)



Fonte: O autor (2020)

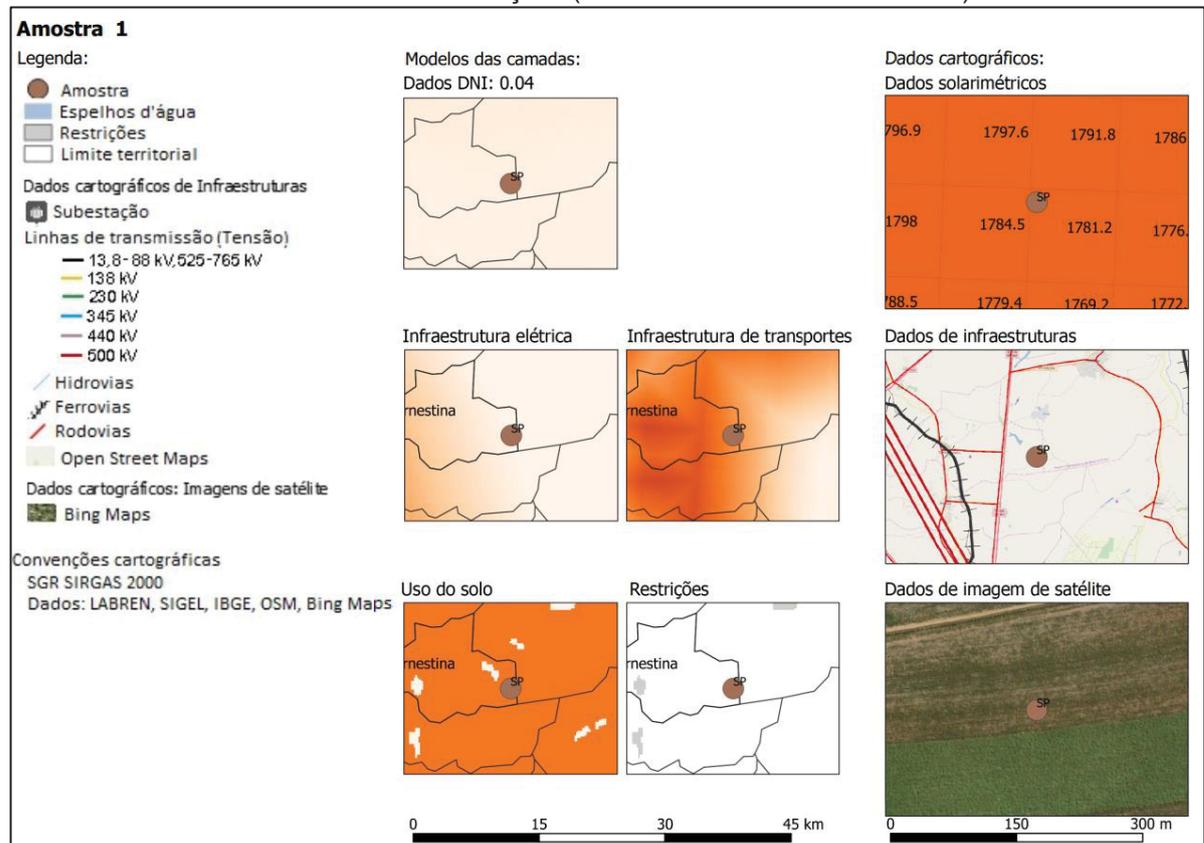
Para comparação de cada item foi obtido um conjunto de dados externos a metodologia, descritos a seguir:

- ✓ Irradiação *DNI* → Dados Solarimétricos do Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia (LABREN, 2017);
- ✓ Proximidade aos elementos da rede elétrica → Mapa Open Street Map (OSM, 2019) + Linhas de transmissão e subestações do Sistema de Informações Geográficas do Setor Elétrico (SIGEL, 2019);
- ✓ Proximidade à infraestrutura de transporte → Mapa OSM (2019) + Infraestrutura de transporte do portal do IBGE (2019);
- ✓ Propriedades do solo → Imagens de satélite Bing Maps (2019);
- ✓ Restrições ambientais → Imagens de satélite Bing Maps (2019) + Unidades de conservação do portal do IBGE (2019).

A análise do modelo de declividade e de disponibilidade hídrica não foram efetuadas devido a dificuldade em encontrar dados cartográficos externos para sua validação. Os demais, foram separados em 3 grupos: Dados cartográficos solarimétricos, dados de infraestrutura (Proximidade aos elementos da rede elétrica

e à infraestrutura de transportes) e dados de imagem de satélite (Propriedades do solo, restrições ambientais). Na Figura 29 é apresentada a amostra 1.

FIGURA 29 – VALIDAÇÃO (AMOSTRA 1 – ERNESTINA/SP)



Fonte: O autor (2020)

Para cada amostra, os índices de viabilidade dos modelos obtidos no projeto, nos intervalos de 0 a 1, respectivamente, restritivo a viabilidade máxima, foram tabelados e comparados aos valores dos dados externos. Já os valores dos dados externos foram tabelados quanto à consistência aos intervalos limítrofes de viabilidade ou segundo seus atributos, por análise visual ou topologia dos dados. Como exemplo, a validação da conformidade temática da amostra 1 é apresentada no Quadro 14.

QUADRO 14 – VALIDAÇÃO (ANÁLISE AMOSTRA 1 – ERNESTINA/SP)

<b>Crêterios</b>	<b>�ndices</b>	<b>Dados cartográficos</b>	<b>Valor</b>	<b>Valida�o</b>
Irradia�o <i>DNI</i>	0.04	Dados Solarimétricos LABREN	1789 kWh/m <sup>2</sup> /ano	�ndice baixo (0.04) <b>condiz</b> com dados cartográfico de <i>DNI</i> = 1789 kWh, próximo do limítrofe do projeto de 1785 kWh
Rede elétrica	0.00	OSM, SIGEL	Proximidade > 15 km	�ndice nulo <b>condiz</b> com excesso da distância limítrofe às linhas de transmissão (LT)
Infraestrutura de transporte	0.51	OSM, IBGE	Proximidade < 15 km de rodovias	�ndice (0.51) <b>condiz</b> com proximidade abaixo do limítrofe identificada nos dados cartográficos
Uso e ocupa�o do solo	3	Bing Maps	�rea agrícola	�ndice classificado como área agrícola <b>condiz</b> com pixel no mapa identificado como área agrícola
Restri�oes	Sem restri�oes	Bing Maps, IBGE	Sem restri�oes	�ndice sem restri�oes <b>condiz</b> com leitura no mapa que identificou área sem restri�oes

FONTE: O autor (2020)

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para obtenção dos resultados, foram utilizadas técnicas visando à automatização dos processos da metodologia. No processo AHP, foram utilizadas fórmulas e equações nas planilhas. Para os dados geoespaciais foi utilizada linguagem Python e o editor do console do software QGIS. Com isso, os processos foram realizados de forma padronizada e foram realizadas repetições em um tempo menor, já que não foi necessário refazer todos os processos manualmente, mas sim de forma semiautomática.

### 5.1. QUESTIONÁRIOS

#### 5.1.1. Caracterização dos participantes do questionário

O número de participações de profissionais para ponderação dos critérios foi identificado no referencial bibliográfico como 15. Visto a possibilidade de descartes de formulários por inconsistência, erros de preenchimento, ou ausência de informações, a lista de profissionais foi ampliada para 47, tanto participantes do projeto, como membros externos, ambos inseridos em áreas correlatas ao projeto.

Dos 47 profissionais convidados, constatou-se um expressivo número de colaborações com 34 formulários recebidos. Conforme Quadro 15, do número de profissionais convidados por instituição e o número de formulários respondidos.

QUADRO 15 – NÚMERO DE PROFISSIONAIS COLABORADORES POR INSTITUIÇÃO E POR FORMULÁRIOS RESPONDIDOS

Instituição	Quantidade de profissionais convidados	Quantidade de formulários respondidos
LACTEC	12	12
CESP	19	11
EUDORA	2	2
RTB Holding Energia	3	1
MFAP Consultoria	3	2
MRTS	2	2
UCP	1	1
Três Rios	2	1
Eletrosul	2	2
Facto Energy	1	0
<b>Total</b>	<b>47</b>	<b>34</b>

FONTE: O autor (2020)

Dos 34 formulários recebidos, com quatro questionários cada, totalizaram-se 136 questionários recebidos através de plataforma *web JotForm* e transcritos em planilhas do *Microsoft Excel*.

Os descartes por inconsistências somaram 18 formulários, houve alguns erros de preenchimento e principalmente baixa consistência nos questionários número 4. Já os selecionados foram 16 formulários, dos quais foi realizada a caracterização dos participantes a partir de suas instituições e especializações, Quadro 16.

QUADRO 16 – NÚMERO DE PROFISSIONAIS COLABORADORES POR INSTITUIÇÃO E POR FORMULÁRIOS RESPONDIDOS

Instituição	Formulários utilizados
LACTEC	5
CESP	4
EUDORA	2
RTB Holding Energia	1
MRTS	2
Eletrosul	2
<b>Total</b>	<b>16</b>

FONTE: O autor (2020)

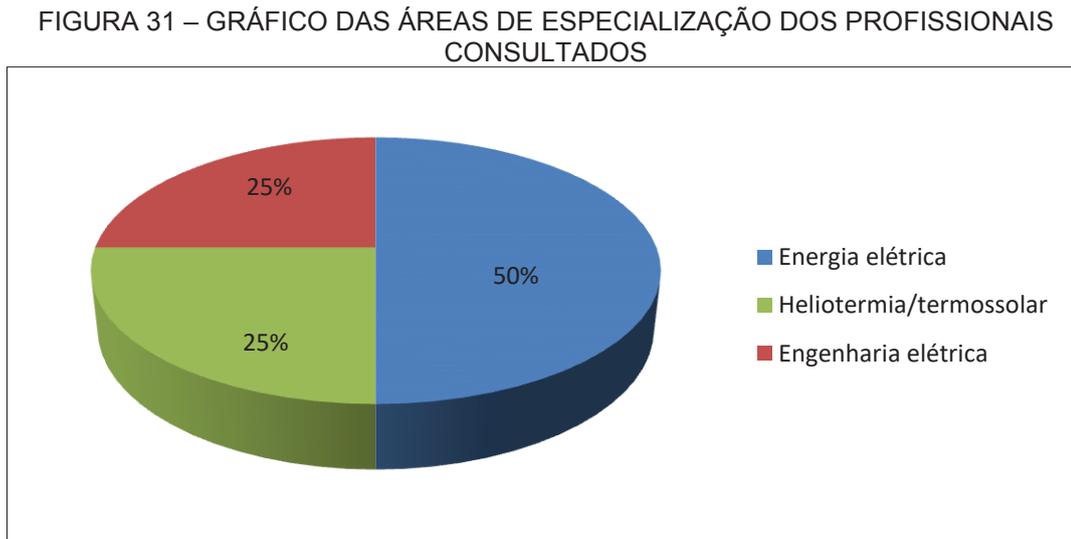
Das instituições participantes, apenas uma não está ligada diretamente ao projeto, a Eletrosul. A Eletrosul é uma empresa de referência nacional em transmissão e geração de energia que também investe em tecnologia heliotérmica. As demais empresas e suas competências gerais no projeto são listadas na Figura 30.

FIGURA 30 – COMPETÊNCIAS GERAIS DAS EMPRESAS COLABORADORAS NO PROJETO



FONTE: O autor (2020)

Uma das informações obtidas no formulário foi a área de especialização dos participantes, em que se constatou que 50% da contribuição foram advindas de especialistas na área de energia elétrica, sendo outros 25% especialistas em Heliotermia e os demais 25% em engenharia elétrica. Conforme gráfico em Figura 31:



FONTE: O autor (2020)

#### 5.1.2. Valores de consistência

Os valores de consistência dos questionários foram calculados conforme o processo *AHP*, e a média da consistência com redundância das 16 observações é demonstrada no Quadro 17.

QUADRO 17 – VALORES DE CONSISTÊNCIA DE CADA QUESTIONÁRIO

Questionário	Razão de consistência (RC)
1	0,01
2	0,08
3	0,07
4	0,10

FONTE: O autor (2020)

Conforme os valores do quadro, a média dos formulários alcançaram razão de consistência (RC) dentro do intervalo sugerido por Saaty de 0,10, que indica 90% de consistência nos valores dos questionários.

### 5.1.3. Ponderações dos subcritérios e critérios

Empregando as equações de ponderação, detalhadas no tópico 4.5.2., para todos os subcritérios e critérios, foram obtidos os pesos em intervalos de variando de 0 a 1, e valores de porcentagem variando de 0% a 100%, (respectivamente, peso nulo a peso total). As ponderações foram divididas em dois grupos, ponderações dos subcritérios (apresentados como 'SC') Quadro 18, Quadro 19 e Quadro 20, e ponderação entre critérios (apresentados como 'C') Quadro 21.

QUADRO 18 – PONDERAÇÃO SUBCRITÉRIOS DE PROXIMIDADE À REDE ELÉTRICA (QUESTIONÁRIO 1)

SC – Subcritério	Peso	Peso (%)
SC1 – Proximidade à linhas de transmissão	0,379	37,9
SC2 – Proximidade a subestações	0,534	53,4
SC3 – Proximidade à aglomerados urbanos	0,086	8,6

FONTE: O autor (2020)

QUADRO 19 – PONDERAÇÃO SUBCRITÉRIOS DE PROXIMIDADE À INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (QUESTIONÁRIO 2)

SC – Subcritério	Peso	Peso (%)
SC1 – Proximidade à rodovia	0,605	60,5
SC2 – Proximidade à ferrovias/estações	0,126	12,6
SC3 – Proximidade à hidrovias/portos	0,063	6,3
SC4 – Proximidade aos aeroportos	0,206	20,6

FONTE: O autor (2020)

QUADRO 20 – PONDERAÇÃO DE SUBCRITÉRIOS DE USO DO SOLO (QUESTIONÁRIO 3)

SC – Subcritério	Peso	Peso (%)
SC1 – Áreas descobertas	0,468	46,8
SC2 – Pastagem	0,272	27,2
SC3 – Agricultura	0,121	12,1
SC4 – Vegetação campestre	0,106	10,6
SC5 – Vegetação florestal	0,033	3,3

FONTE: O autor (2020)

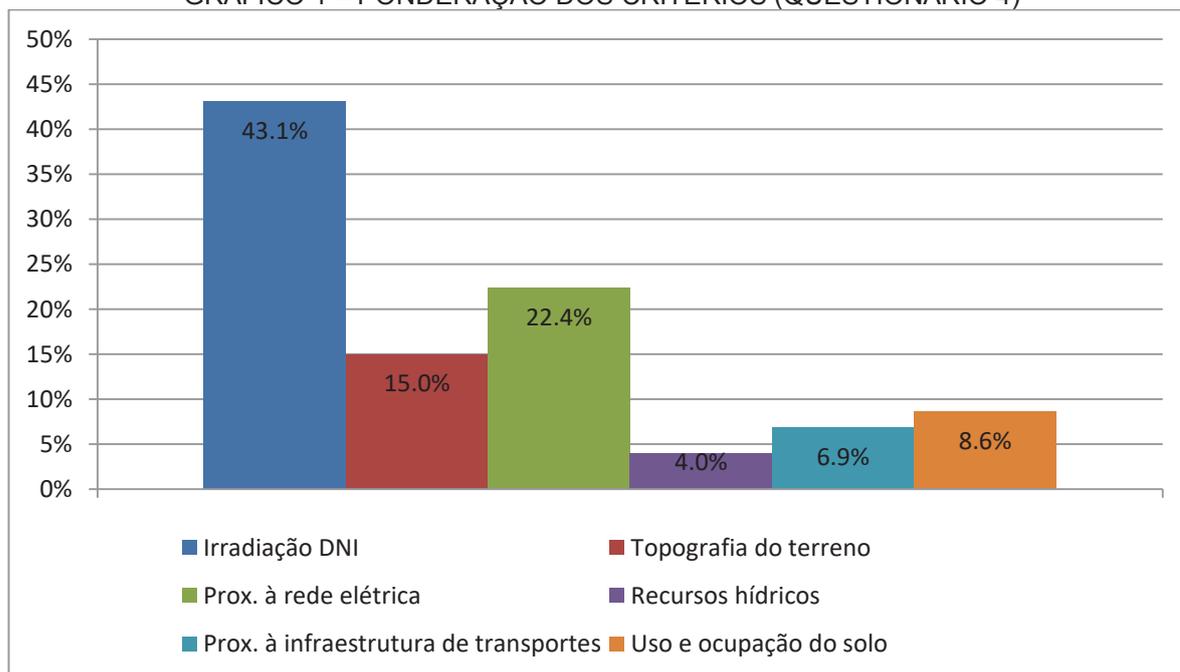
QUADRO 21 – PONDERAÇÃO ENTRE CRITÉRIOS (QUESTIONÁRIO 4)

C – Critério	Peso	Peso (%)
C1 - Irradiação <i>DNI</i>	0,431	43,1
C2 - Topografia do terreno	0,150	15,0
C3 - Proximidade à rede elétrica	0,224	22,4
C4 - Recursos hídricos	0,040	4,0
C5 - Proximidade à infraestrutura de transportes	0,069	6,9
C6 - Uso e ocupação do solo	0,086	8,6

FONTE: O autor (2020)

No Gráfico 1 GRÁFICO 1 foram destacadas as diferenças relativas do Quadro 21, em que o maior peso é o de irradiação solar direta normal (DNI), com 43,1%, sendo o critério com maior relevância no projeto, e com menor relevância, somente 4%, o critério de recursos hídricos.

GRÁFICO 1 – PONDERAÇÃO DOS CRITÉRIOS (QUESTIONÁRIO 4)



FONTE: O autor (2020)

## 5.2. MODELO DE VIABILIDADE

É importante destacar que no processamento dos dados geoespaciais foi utilizado linguagem Python e o editor do console do software QGIS. Neste, foram declaradas as variáveis e inseridos os dados geoespaciais e ponderações das

precondições, e chamadas às funções das bibliotecas do software na sequência de automatização parcial dos processamentos.

O modelo de viabilidade foi gerado através da relação entre os dados processados e padronizados (Figura 27) e as ponderações do processo AHP (Quadro 21) aplicados na equação 13. Desta forma, pela álgebra de mapas entre as camadas ponderadas com seus respectivos pesos, foi composta a equação (14):

$$\text{Modelo viabilidade} = (\sum_i^n \text{Camada do critério}_i * \text{Peso do critério}_i) * \text{Restrições} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \text{Modelo viabilidade} = & (\text{Irradiação solar DNI} * 0.431 \\ & + \text{Topografia do terreno} * 0.15 \\ & + \text{Rede elétrica} * 0.224 \\ & + \text{Recursos hídricos} * 0.04 \\ & + \text{Infraestrutura de transportes} * 0.069 \\ & + \text{Ocupação do solo} * 0.086) \\ & * \text{Restrições} \end{aligned}$$

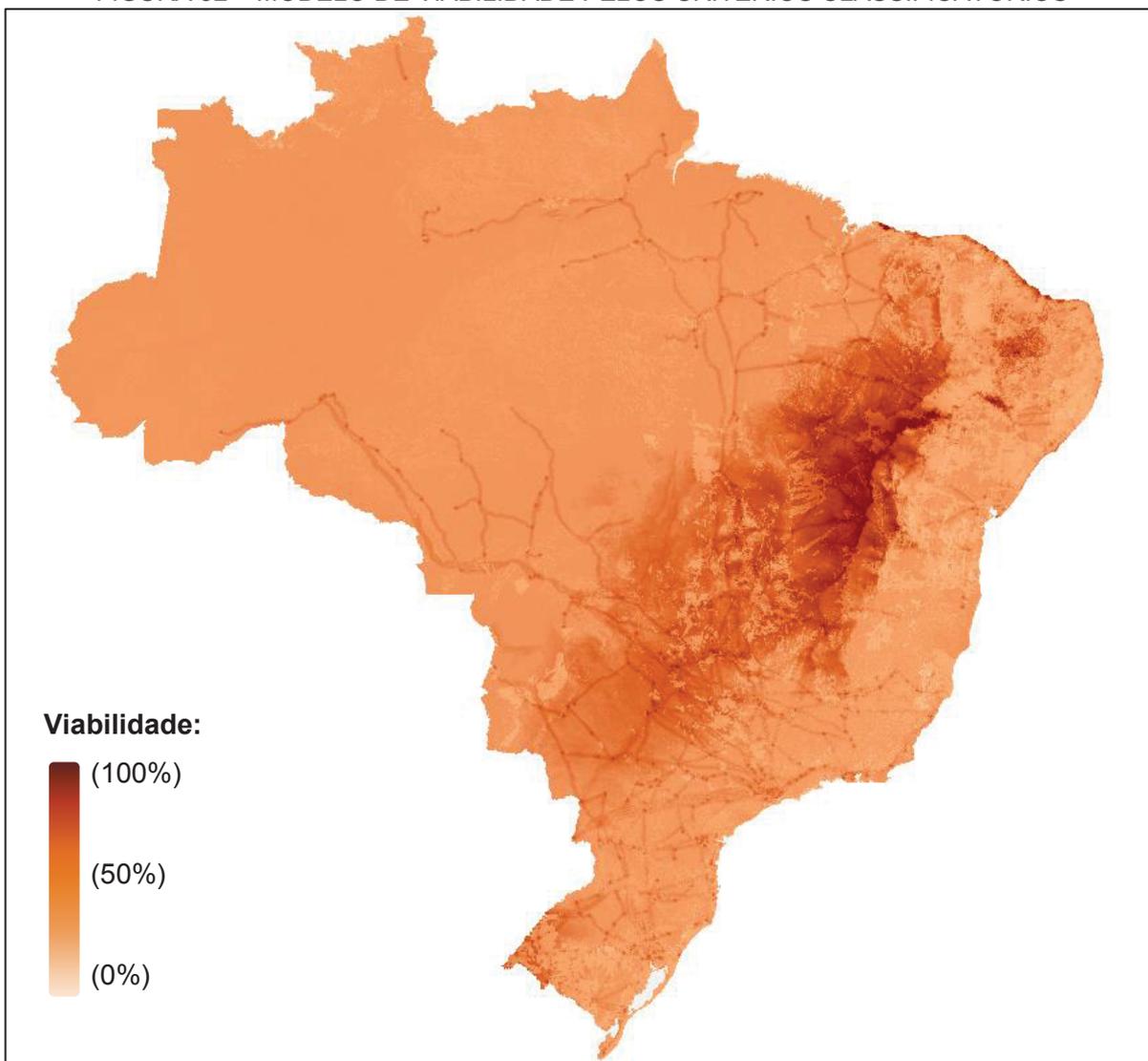
Para a visualização do modelo foi proposta a representação pelo tom alaranjado, com variação na luminosidade do tom pela adição de branco, da qual, quanto mais claro, menor a viabilidade. Os locais classificados como restritivos foram representados na cor branca.

Como indicativo de viabilidade foi proposto índices relativos de 0% a 100%, baseados, respectivamente, nos locais restritivos e no local ideal do qual atende a todos os critérios, classificando-se os índices como:

- Índice de 100%: Locais no qual todos os critérios atingiram valores ideais de 100% à construção (não foram encontrados locais com este índice);
- Índice máximo: São os índices máximos encontrados em cada mapa, que delimitam a variação máxima da luminosidade do tom na representação;
- Índices entre 50% e 100%: São caracterizados como locais com viabilidade alta;
- Índices entre 0% e 50%: Indicam tendência à viabilidade, porém é necessário ampliar os estudos para confirmação destes locais;
- Índice de 0% ou nulo: São locais em que não há viabilidade, caracterizados como restritivos.

A Figura 32 traz a representação do modelo somente com os critérios classificatórios de viabilidade. Em todo o território brasileiro são identificadas precondições que contribuem à implantação de usinas heliotérmicas com significâncias distintas.

FIGURA 32 – MODELO DE VIABILIDADE PELOS CRITÉRIOS CLASSIFICATÓRIOS



FONTE: O autor (2020)

O modelo gerado a partir dos critérios de restrição, critérios ambientais, áreas urbanizadas e espelhos d'água, restringiu pequenas áreas do Brasil. Com a inserção da restrição de valores de *DNI* menores que o sugerido, de 1784 kWh/m<sup>2</sup>/ano, tem-se uma restrição de grande parte do Brasil, principalmente região Norte e serras litorâneas, exibido na Figura 33.

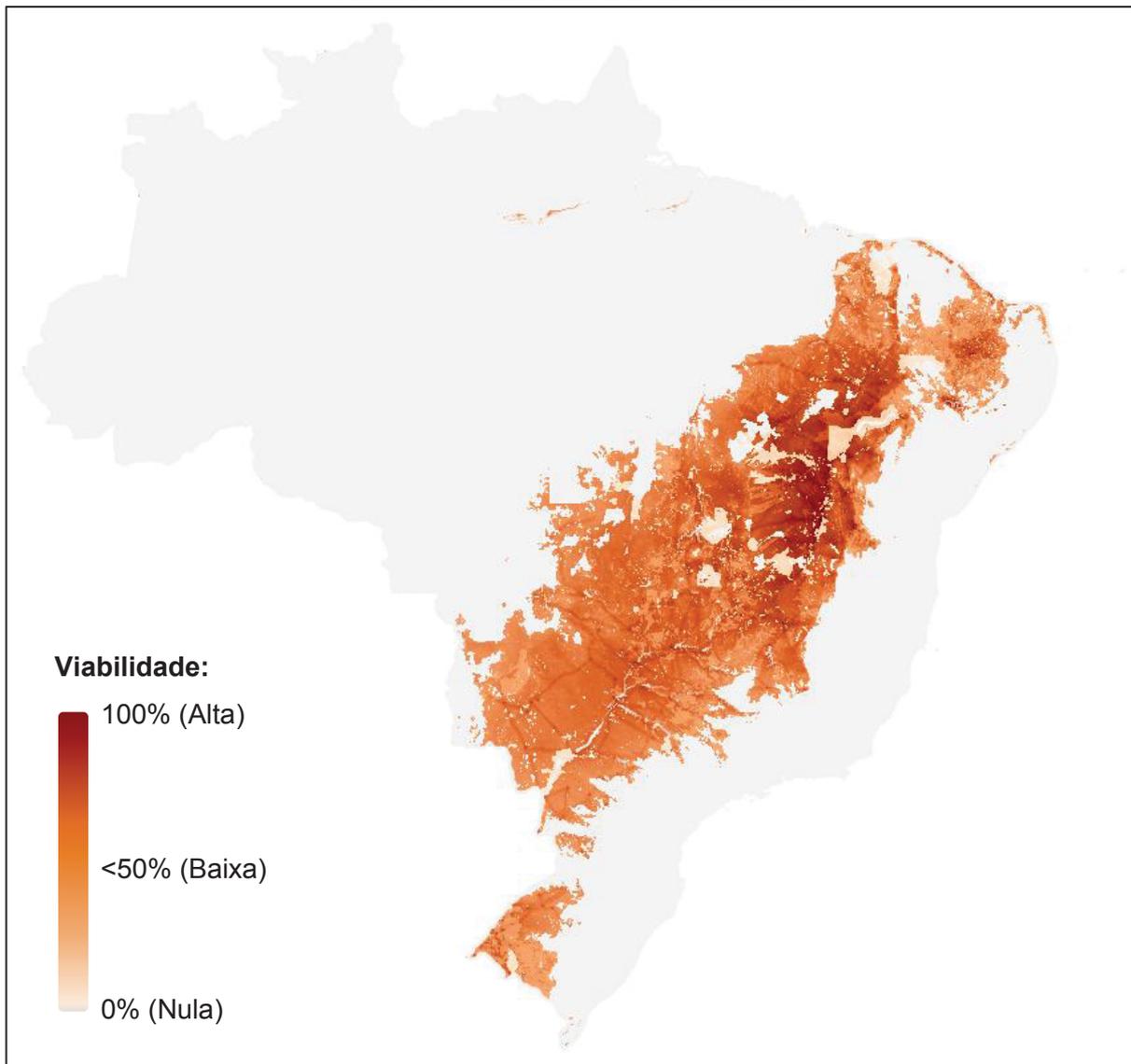
FIGURA 33 – MODELO DE ÁREAS RESTRITIVAS



FONTE: O autor (2020)

A partir dos dois modelos anteriores gerou-se o modelo da estimativa de viabilidade à implantação das usinas heliotérmicas no Brasil, conforme Figura 34.

FIGURA 34 – MODELO DE VIABILIDADE



FONTE: O autor (2020)

### 5.3. VALIDAÇÃO DO MODELO

A partir da análise baseada na acurácia temática e da tabulação dos 500 itens amostrais, foram verificadas a consistência de 96% dos itens, ocorrendo 4% de divergência, das quais são exibidos no Quadro 22.

QUADRO 22 – VALIDAÇÃO (ANÁLISE DE INCONSISTÊNCIAS)

Amostra	Modelo do critério	Índice	Dados cartográficos externos	Valor dos dados externos	Verificação
07 (Capitão Gervásio Oliveira/PI)	Cobertura e uso do solo	2	Bing Maps	Área agrícola	Índice 2 (Pastagem) diverge dos dados cartográficos externos de área agrícola
12 (Baianópolis/BA)	Cobertura e uso do solo	3	Bing Maps	Área florestal	Índice 3 (área agrícola) diverge dos dados cartográficos
18 (Campos Lindos/TO)	Irradiação <i>DNI</i>	0.01	Dado Solarimétrico LABREN	1647 kWh/m <sup>2</sup> /ano	Índice diverge de dados cartográficos que indicam abaixo do limítrofe
20 (Buritizeiro/MG)	Infraestrutura de transporte	0.48	OSM, IBGE	Proximidade > 15 km	Índice diverge dos dados em que não foram identificadas infraestruturas em até 15km
24	Cobertura e uso do solo	3	Bing Maps	Areia	Índice 3 (área agrícola) diverge dos dados cartográficos
30	Cobertura e uso do solo	2	Bing Maps	Vegetação baixa	Índice 2 (pastagem) diverge dos dados cartográficos
34	Cobertura e uso do solo	2	Bing Maps	Vegetação baixa	Índice 2 (pastagem) diverge dos dados cartográficos
37	Irradiação <i>DNI</i>	0.023	LABREN	<1785 kWh/m <sup>2</sup> /ano	Índice acima do valor dos dados cartográficos
43	Irradiação <i>DNI</i>	0.058	LABREN	<1785 kWh/m <sup>2</sup> /ano	Índice acima do valor dos dados cartográficos
58	Cobertura e uso do solo	4	Bing Maps	Pastagem	Índice 4 (vegetação baixa) diverge dos dados cartográficos
65	Irradiação <i>DNI</i>	0.014	LABREN	<1785 kWh/m <sup>2</sup> /ano	Índice acima do valor dos dados cartográficos
65	Cobertura e uso do solo	3	Bing Maps	Vegetação baixa	Índice 3 (área agrícola) diverge dos dados cartográficos
66	Cobertura e uso do solo	3	Bing Maps	Vegetação baixa	Índice 3 (área agrícola) diverge dos dados cartográficos
72	Irradiação <i>DNI</i>	0.097	LABREN	<1785 kWh/m <sup>2</sup> /ano	Índice acima do valor dos dados cartográficos
77	Irradiação <i>DNI</i>	0.060	LABREN	<1785 kWh/m <sup>2</sup> /ano	Índice acima do valor dos dados cartográficos
81	Irradiação <i>DNI</i>	0.019	LABREN	<1785 kWh/m <sup>2</sup> /ano	Índice acima do valor dos dados cartográficos
83	Irradiação <i>DNI</i>	0.076	LABREN	<1785 kWh/m <sup>2</sup> /ano	Índice acima do valor dos dados cartográficos
84	Irradiação <i>DNI</i>	0.08	LABREN	<1785 kWh/m <sup>2</sup> /ano	Índice acima do valor dos dados cartográficos
89	Irradiação <i>DNI</i>	0.132	LABREN	<1785 kWh/m <sup>2</sup> /ano	Índice acima do valor dos dados cartográficos

FONTE: O autor (2020)

Das inconsistências encontradas, cerca de 50% devem-se ao uso e ocupação do solo, em que foram identificadas nas imagens de satélite ocupações diferentes do modelo gerado no projeto. Os demais 50%, devido à irradiação *DNI*, em que o modelo corresponde a um valor maior de 1785 kWh/m<sup>2</sup>/ano, enquanto no dado externo é inferior, por exemplo, na amostra 18, de 1647 kWh/m<sup>2</sup>/ano. Acredita-se que as inconsistências foram ocasionadas por: Desatualização dos dados geoespaciais, com alterações no uso e ocupação do solo; e diferentes interpoladores dos índices solarimétricos comparados.

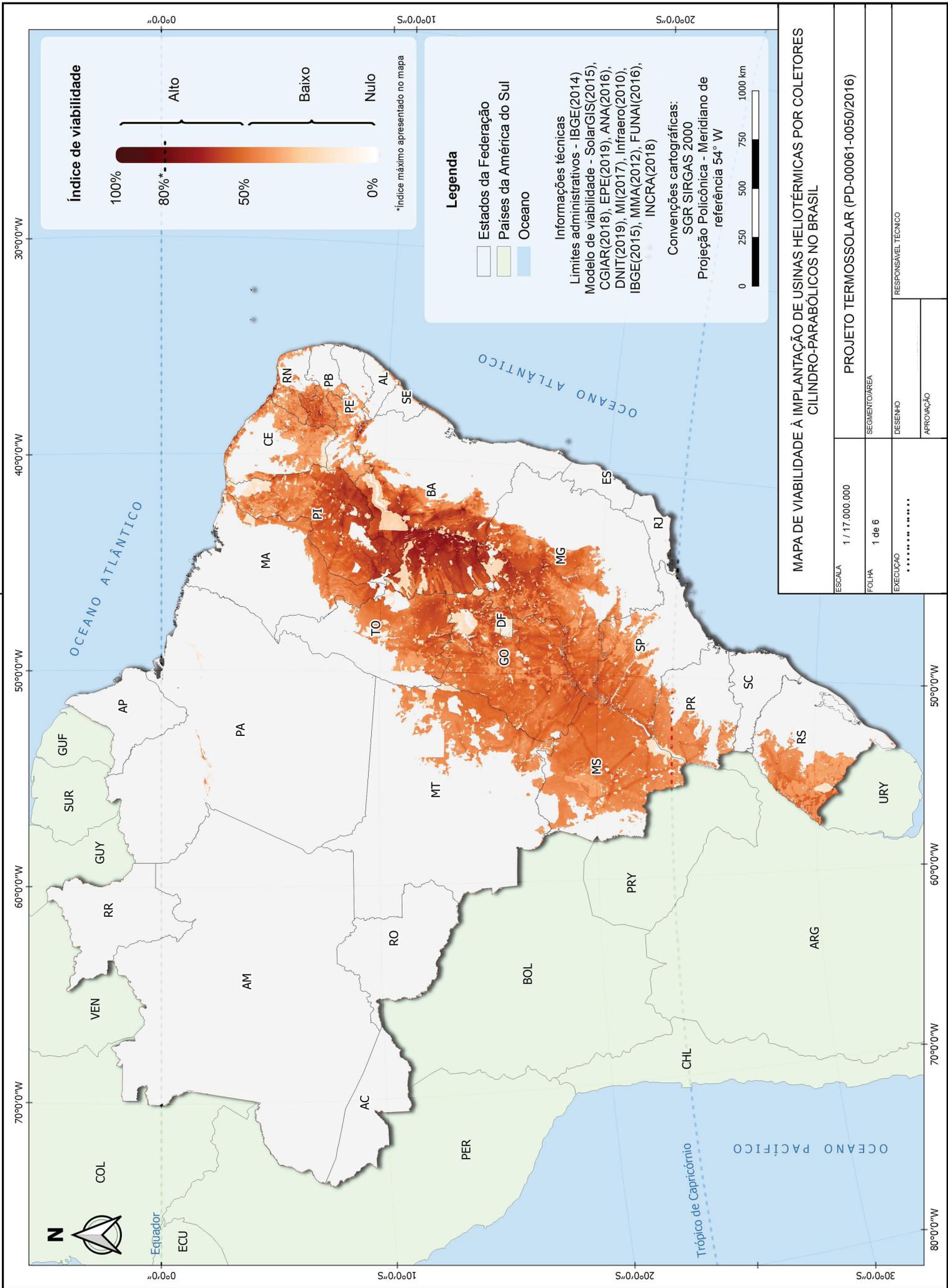
Contudo, pela consistência dos modelos processados para os dados geoespaciais pela acurácia temática, e das ponderações pela razão de consistência *AHP*, é validado o modelo resultante, tendo como produto a consistência das etapas intermediárias no resultado final.

#### 5.4. REPRESENTAÇÃO DO MODELO DE ANÁLISE MULTICRITÉRIO ESPACIAL DE VIABILIDADE EM MAPAS

Os mapas foram gerados através do software QGIS, a partir de premissas cartográficas de confecção de mapas, assim como das cores de representação destacadas no tópico anterior, da variação da luminosidade do tom alaranjado, sendo a viabilidade inversamente proporcional a luminosidade. Para representação do modelo, foram gerados mapas da Federação e das regiões em separado, em folhas A3.

##### 5.4.1. Mapa da análise das regiões do Brasil

Os resultados estimados para o território brasileiro demonstram tendência de viabilidade numa faixa diagonal que vai do nordeste do Brasil ao centro-oeste, com destaque a estados do nordeste, sudeste e centro-oeste. Observa-se que locais com as maiores viabilidades concentram-se em locais com os maiores índices de *DNI* do país. Enquanto que nas regiões litorâneas e na região norte, devido aos índices de *DNI* abaixo do limítrofe utilizado na metodologia, as áreas são consideradas restritivas à tecnologia.

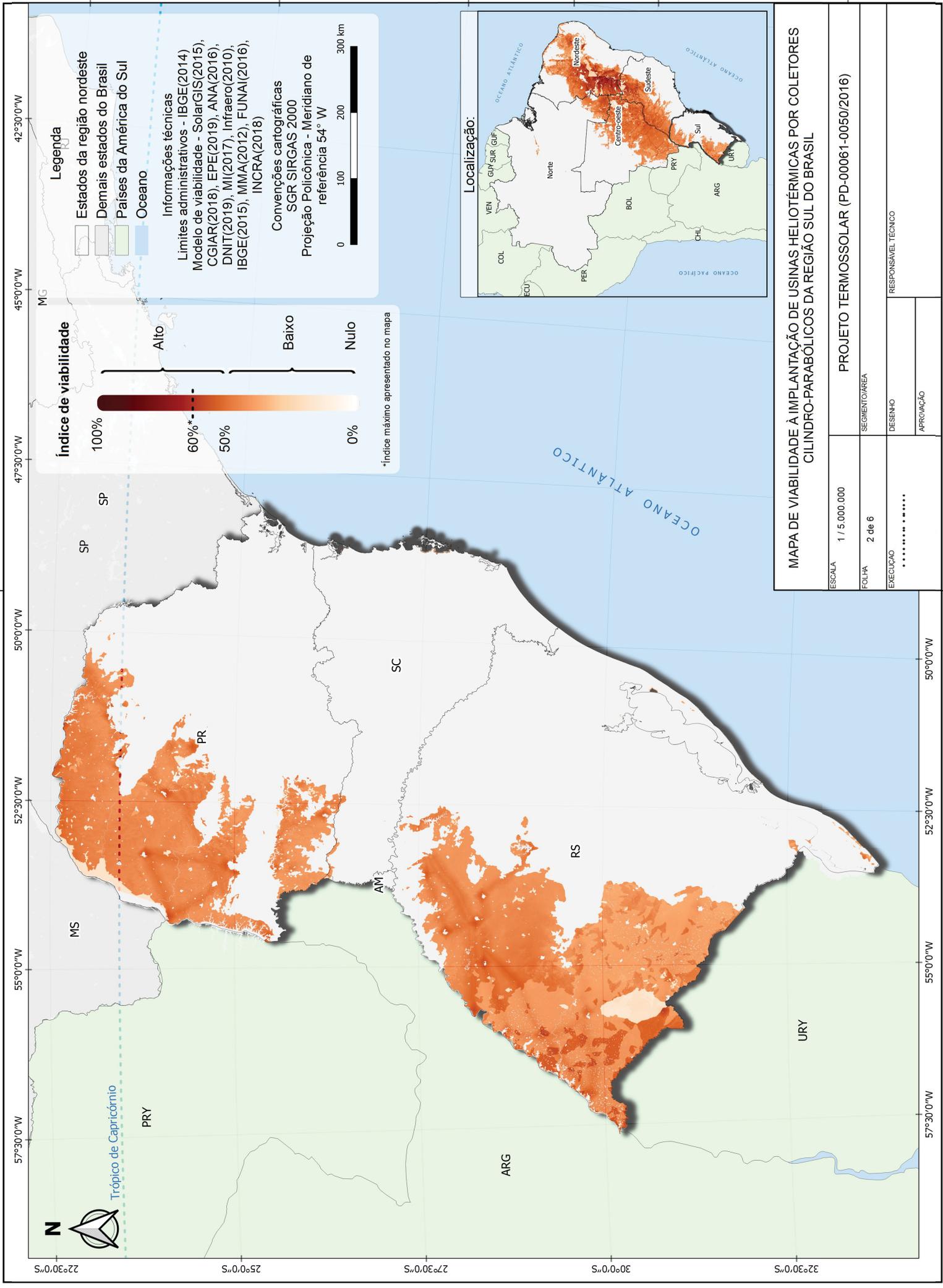


**MAPA DE VIABILIDADE À IMPLANTAÇÃO DE USINAS HELIOTÉRMICAS POR COLETORES CILINDRO-PARABÓLICOS NO BRASIL**

ESCALA	1 / 17.000.000	PROJETO TERMOSSOLAR (PD-00061-0050/2016)
FOLHA	1 de 6	SEGMENTO/ÁREA
EXECUÇÃO	.....	DESENHO
		APROVAÇÃO
		RESPONSÁVEL TÉCNICO

#### 5.4.2. Mapa da análise da região sul

Na análise dos resultados por regiões, na região sul foi identificado áreas compatíveis com a tecnologia, porém, com índices relativos considerados baixos, abaixo de 50%, em que é indicado a ampliação do estudo nestas áreas para confirmação da viabilidade. Grande parte da região é considerada restritiva devido aos baixos índices de *DNI*.



**Legenda**

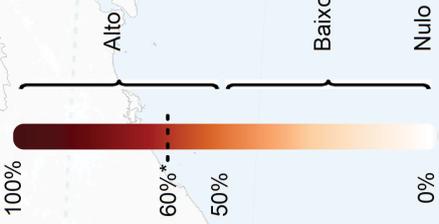
- Estados da região nordeste
- Demais estados do Brasil
- Países da América do Sul
- Oceano

**Informações técnicas**  
 Limites administrativos - IBGE(2014)  
 Modelo de viabilidade - SolarGIS(2015),  
 CGIAR(2018), EPE(2019), ANA(2016),  
 DNIT(2019), MI(2017), Infracore(2010),  
 IBGE(2015), MMA(2012), FUNAI(2016),  
 INCRA(2018)

**Convenções cartográficas**  
 SGR SIRGAS 2000  
 Projeção Policônica - Meridiano de  
 referência 54° W

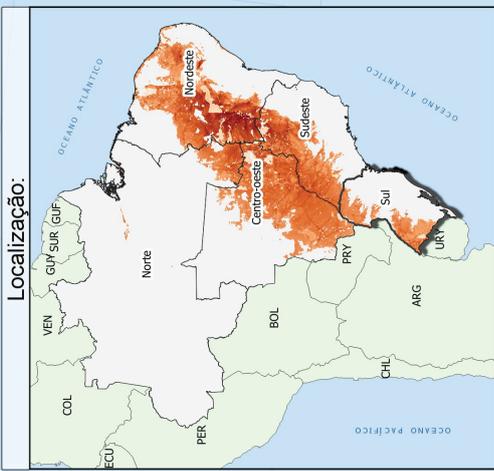


**Índice de viabilidade**



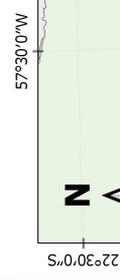
\*Índice máximo apresentado no mapa

**Localização:**



**MAPA DE VIABILIDADE À IMPLANTAÇÃO DE USINAS HELIOTÉRMICAS POR COLETORES CILINDRO-PARABÓLICOS DA REGIÃO SUL DO BRASIL**

ESCALA	1 / 5.000.000	PROJETO TERMOSSOLAR (PD-00061-0050/2016)
FOLHA	2 de 6	SEGMENTO/ÁREA
EXECUÇÃO	.....	DESENHO
		APROVAÇÃO
		RESPONSÁVEL TÉCNICO



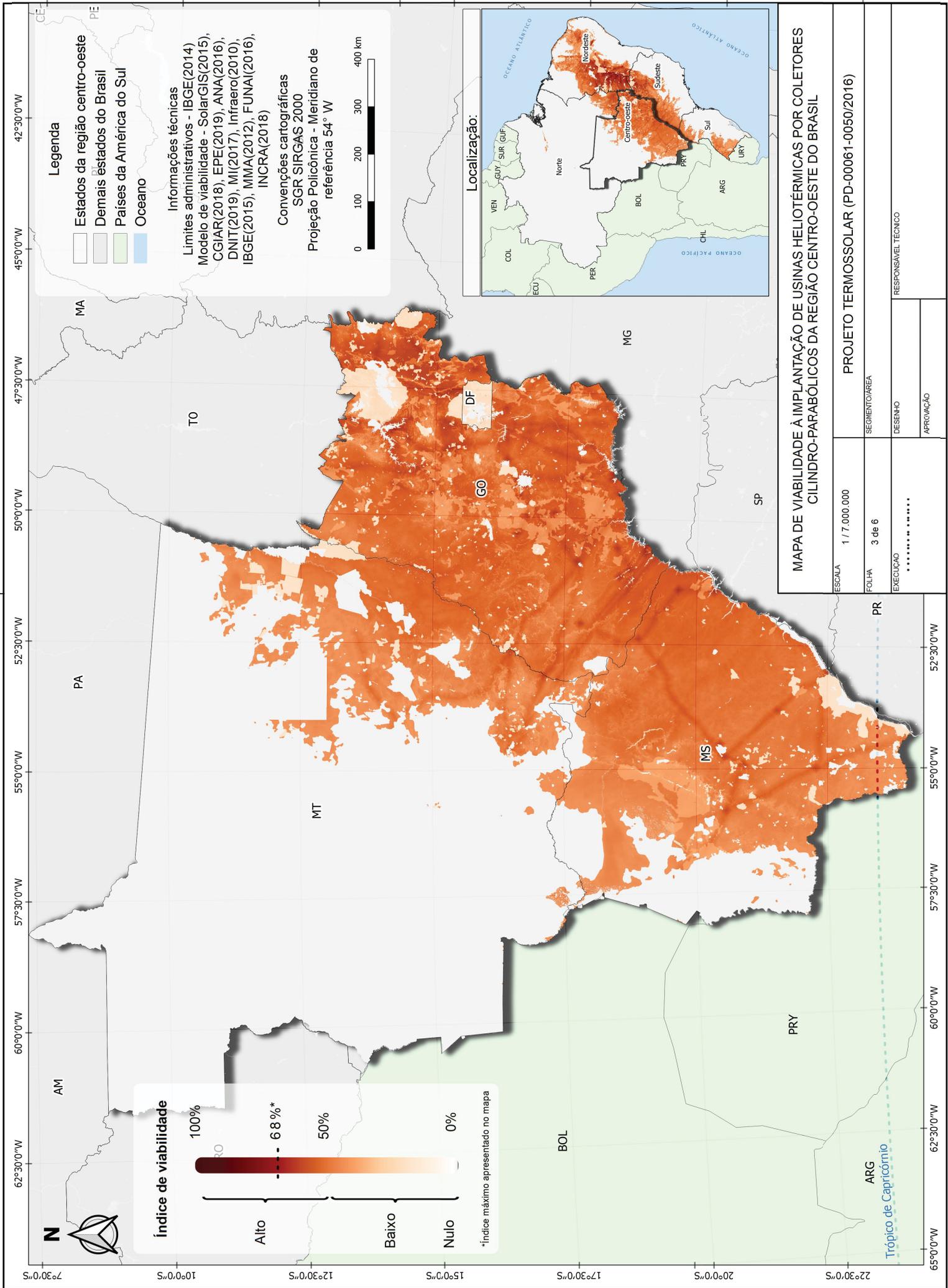
57°30'0"W 55°0'0"W 52°30'0"W 50°0'0"W 47°30'0"W 45°0'0"W 42°30'0"W

22°30'0"S 25°0'0"S 27°30'0"S 30°0'0"S 32°30'0"S

57°30'0"W 55°0'0"W 52°30'0"W 50°0'0"W

#### 5.4.3. Mapa da análise da região centro-oeste

Na região centro-oeste, no estado de Goiás e grande parte do Mato Grosso do Sul, foram encontrado índices entre 40% e 60%. Próximos das divisas com a região sudeste e nordeste foram obtidos índices de até 60%.



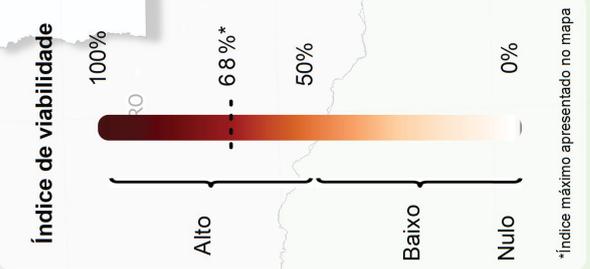
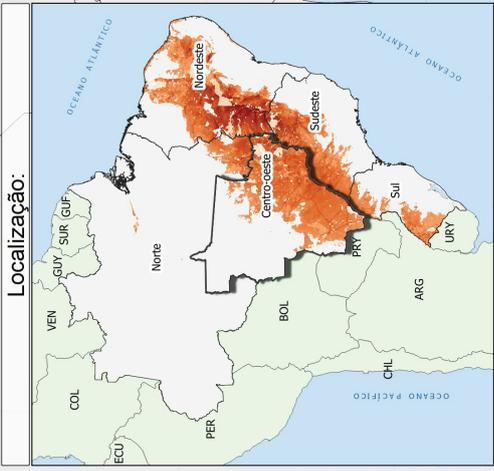
**Legenda**

- Estados da região centro-oeste
- Demais estados do Brasil
- Países da América do Sul
- Oceano

**Informações técnicas**

Limites administrativos - IBGE(2014)  
 Modelo de viabilidade - SolarGIS(2015),  
 CGIAR(2018), EPE(2019), ANA(2016),  
 DNIT(2019), MI(2017), Infraero(2010),  
 IBGE(2015), MMA(2012), FUNAI(2016),  
 INCRA(2018)

Convenções cartográficas  
 SGR SIRGAS 2000  
 Projeção Policônica - Meridiano de  
 referência 54° W



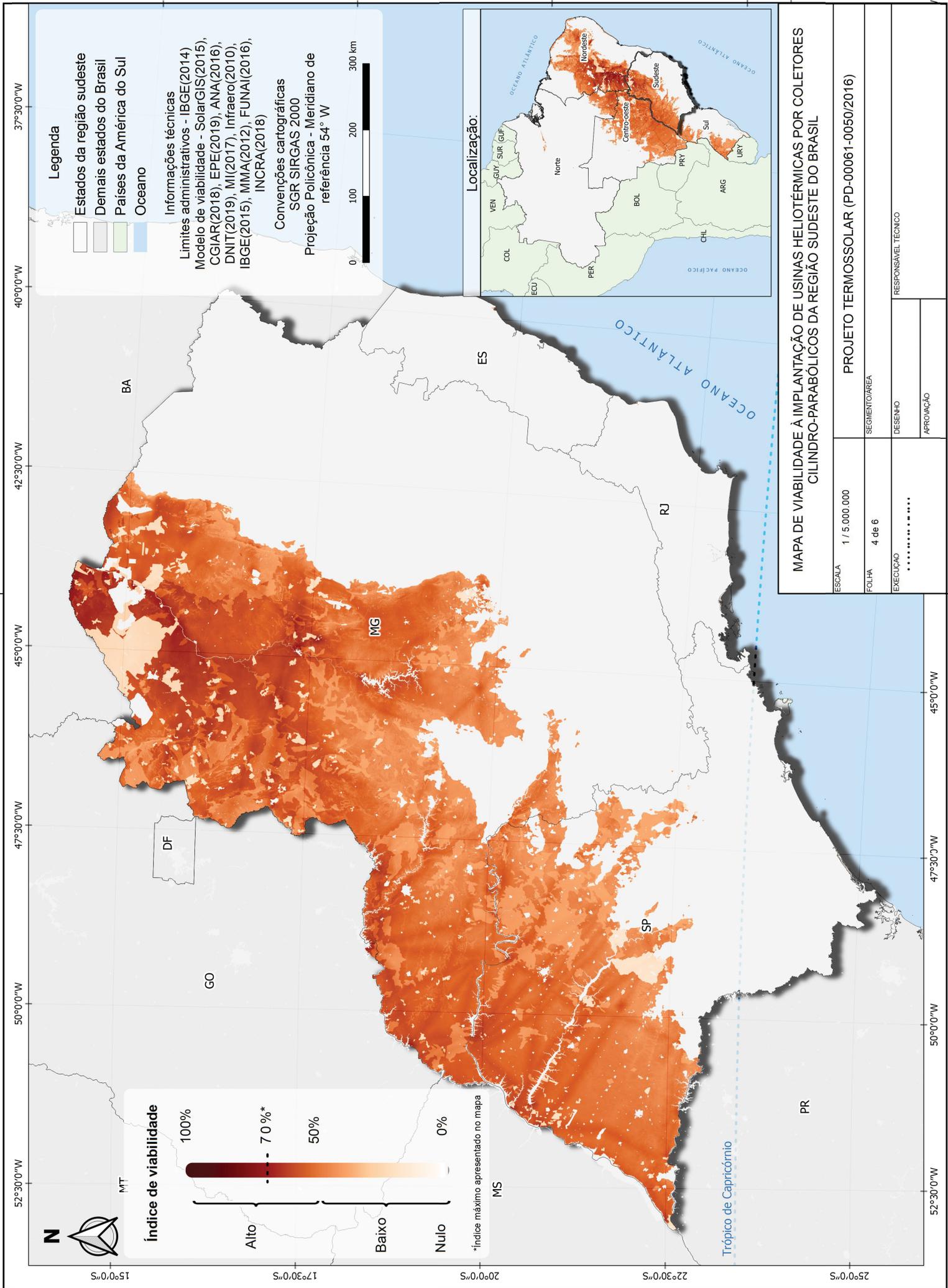
**MAPA DE VIABILIDADE À IMPLANTAÇÃO DE USINAS HELIOTÉRMICAS POR COLETORES CILINDRO-PARABÓLICOS DA REGIÃO CENTRO-OESTE DO BRASIL**

ESCALA	1 / 7.000.000	PROJETO TERMOSSOLAR (PD-00061-0050/2016)
FOLHA	3 de 6	SEGMENTO/ÁREA
EXECUÇÃO	.....	DESENHO
		APROVAÇÃO
		RESPONSÁVEL TÉCNICO

ARG  
 Trópico de Capricórnio

#### 5.4.4. Mapa da análise região sudeste

No sudeste, ao oeste de São Paulo em direção ao noroeste de Minas Gerais, os valores de viabilidade variam de 40% até 66%. A região onde se localiza a UHE Porto Primavera, na cidade de Rosana, estado de São Paulo, conta com índices que variam de 50% a 62%. Já as regiões este e sul de ambos estados, junto aos demais estados do sudeste, são caracterizados como restritivos devido aos índices baixos de *DNI*.



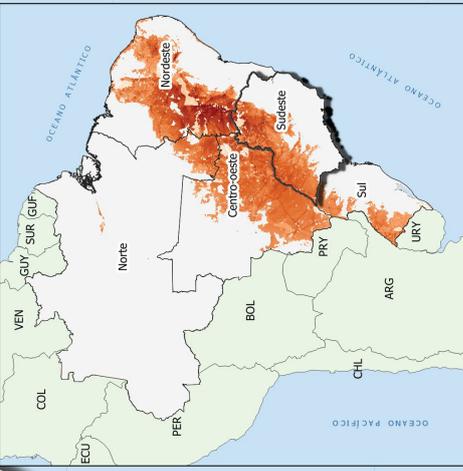
**Legenda**

- Estados da região sudeste
- Demais estados do Brasil
- Países da América do Sul
- Oceano

Informações técnicas  
 Limites administrativos - IBGE(2014)  
 Modelo de viabilidade - SolarGIS(2015),  
 CGIAR(2018), EPE(2019), ANA(2016),  
 DNIT(2019), MI(2017), Infraero(2010),  
 IBGE(2015), MMA(2012), FUNAI(2016),  
 INCRA(2018)  
 Convenções cartográficas  
 SGR SIRGAS 2000  
 Projeção Policônica - Meridiano de  
 referência 54° W



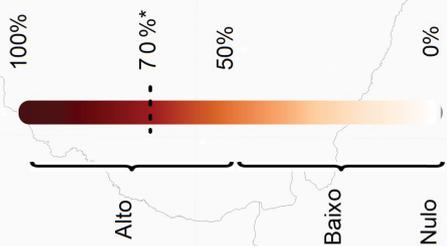
**Localização:**



**MAPA DE VIABILIDADE À IMPLANTAÇÃO DE USINAS HELIOTÉRMICAS POR COLETORES  
 CILINDRO-PARABÓLICOS DA REGIÃO SUDESTE DO BRASIL**

ESCALA	1 / 5.000.000	SEGMENTO/ÁREA	PROJETO TERMOSSOLAR (PD-00061-0050/2016)
FOLHA	4 de 6	DESENHO	
EXECUÇÃO	.....	APROVAÇÃO	
		RESPONSÁVEL TÉCNICO	

**Índice de viabilidade**



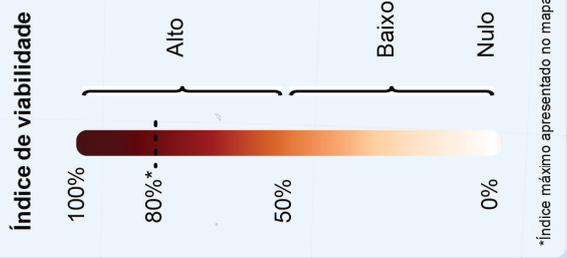
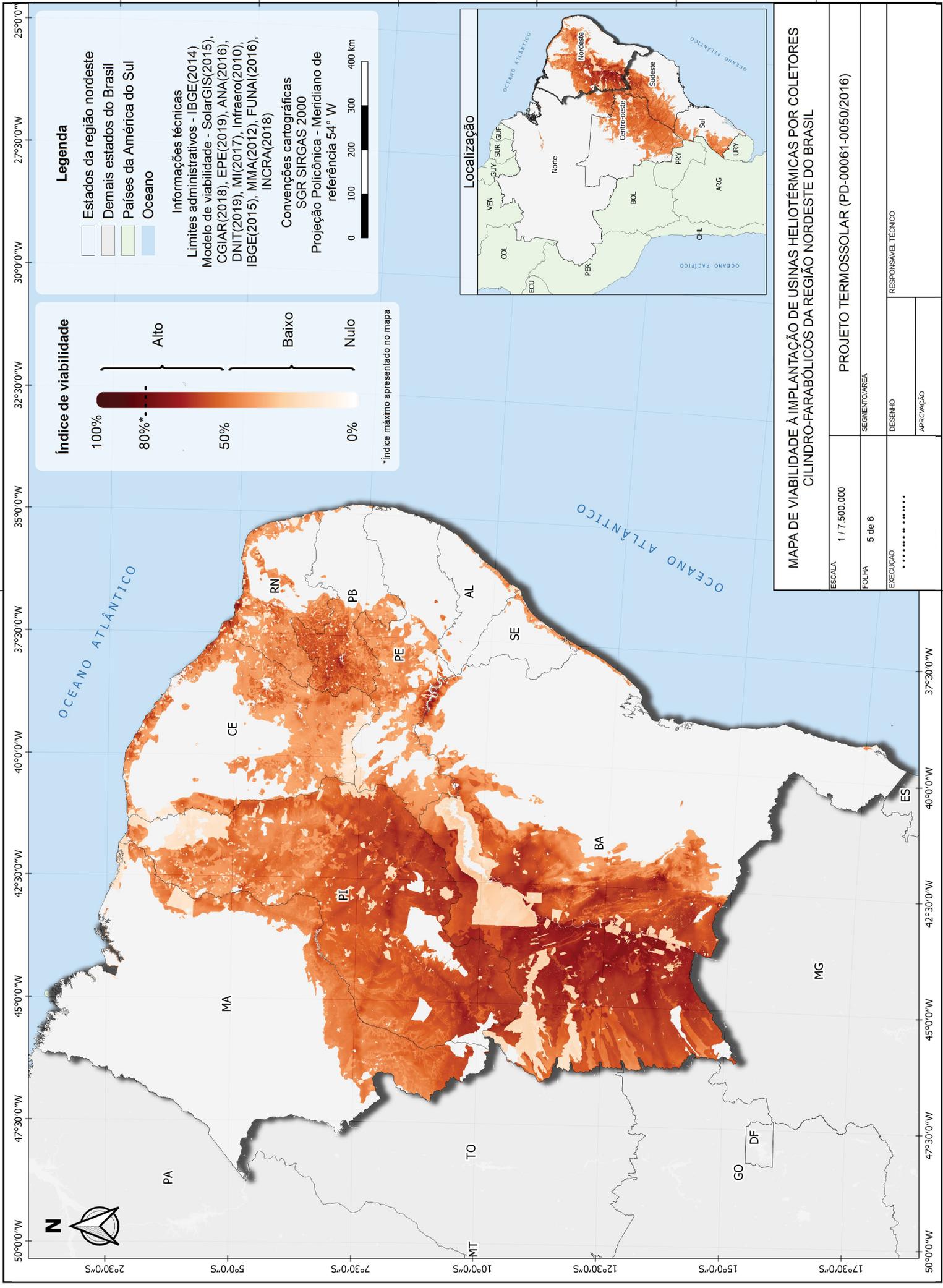
\*Índice máximo apresentado no mapa

52°30'0"W 50°0'0"W 47°30'0"W 45°0'0"W 42°30'0"W 40°0'0"W 37°30'0"W

15°0'0"S 17°30'0"S 20°0'0"S 22°30'0"S 25°0'0"S

#### 5.4.5. Mapa da análise da região nordeste

Na região nordeste encontram-se os estados mais adequados à tecnologia heliotérmica, segundo os critérios abordados na metodologia e principalmente aos altos índices de *DNI* da região. Ao sul do Piauí foram obtidos valores de até 70% de viabilidade, enquanto ao oeste e noroeste da Bahia, valores de até 80% de viabilidade, os maiores índices encontrados no país.



**Legenda**

- Estados da região nordeste
- Demais estados do Brasil
- Países da América do Sul
- Oceano

**Informações técnicas**

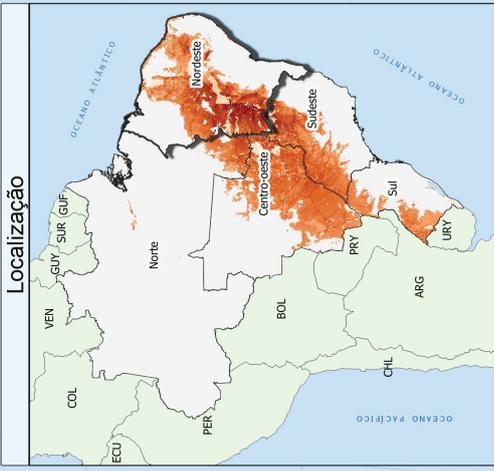
Limites administrativos - IBGE(2014)

Modelo de viabilidade - SolarGIS(2015), CGIAR(2018), EPE(2019), ANA(2016), DNIT(2019), MI(2017), Infraero(2010), IBGE(2015), MMA(2012), FUNAI(2016), INCRA(2018)

Convenções cartográficas SGR SIRGAS 2000

Projeção Policônica - Meridiano de referência 54° W

0 100 200 300 400 km



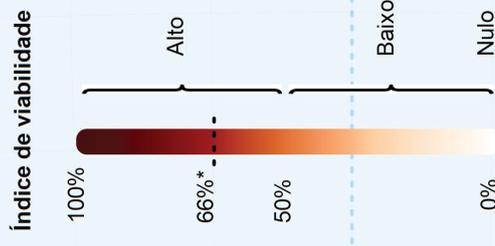
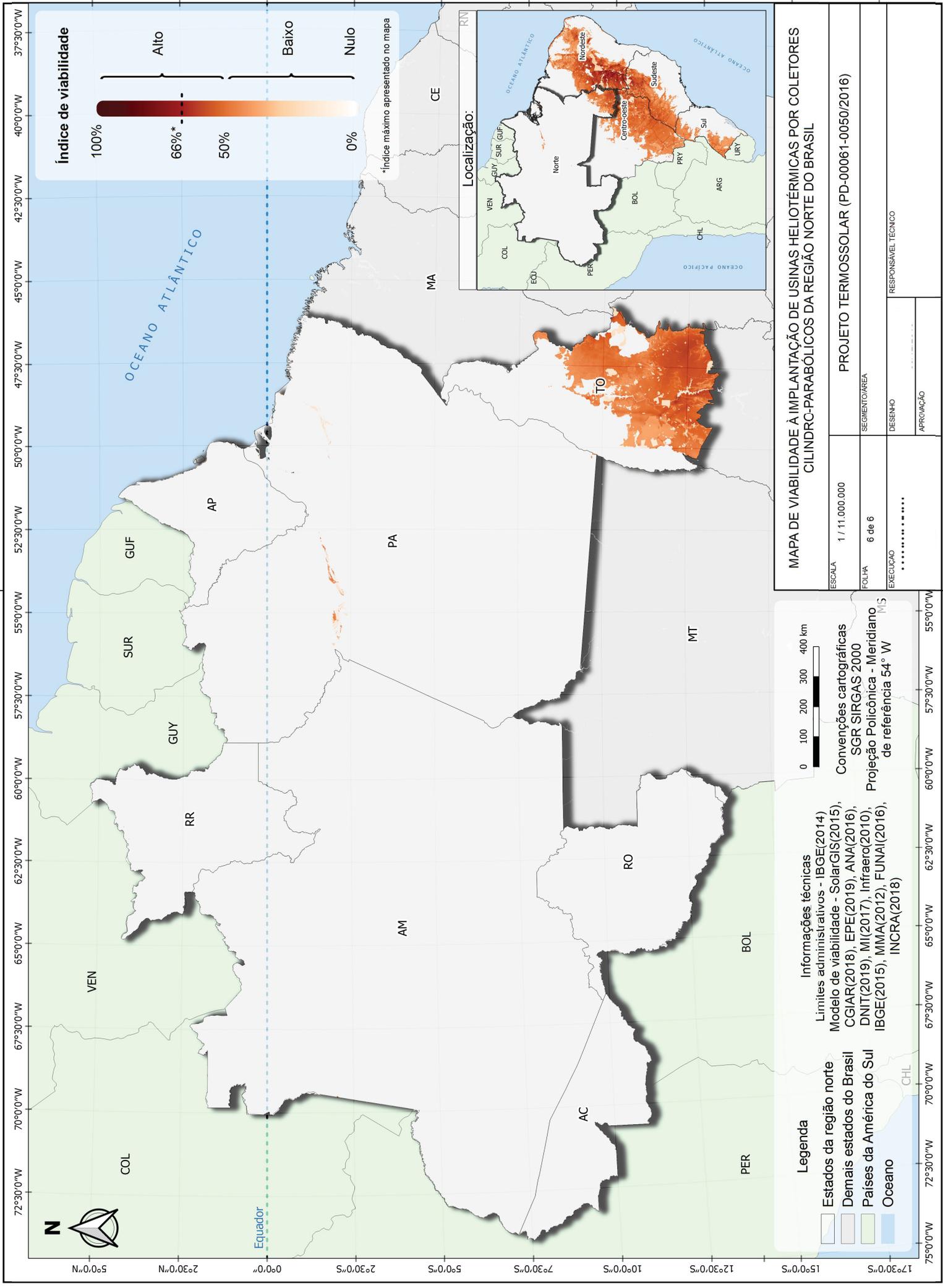
<b>MAPA DE VIABILIDADE À IMPLANTAÇÃO DE USINAS HELIOTÉRMICAS POR COLETORES CILINDRO-PARABÓLICOS DA REGIÃO NORDESTE DO BRASIL</b>	
ESCALA	1 / 7.500.000
FOLHA	5 de 6
EXECUÇÃO	*****
DESENHO	*****
APROVAÇÃO	*****
RESPONSÁVEL TÉCNICO	*****
PROJETO TERMOSSOLAR (PD-00061-0050/2016)	
SEGMENTO/ÁREA	

50°0'0"W 47°30'0"W 45°0'0"W 42°30'0"W 40°0'0"W 37°30'0"W 35°0'0"W 32°30'0"W 30°0'0"W 27°30'0"W 25°0'0"W

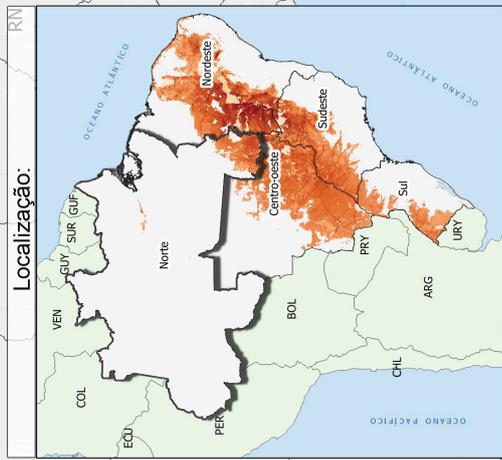
50°0'0"S 47°30'0"S 45°0'0"S 42°30'0"S 40°0'0"S 37°30'0"S 35°0'0"S 32°30'0"S 30°0'0"S 27°30'0"S 25°0'0"S

#### 5.4.6. Mapa da análise da região norte

A região norte foi quase totalmente considerada como restritiva, os índices de *DNI* abaixo do limítrofe inviabilizam a tecnologia praticamente em todas as áreas da região. Apenas ao sul de Tocantins, nas divisas com os estados de Goiás e Bahia, foram obtidos índices favoráveis de 40% a 60%.



\*Índice máximo apresentado no mapa



**MAPA DE VIABILIDADE À IMPLANTAÇÃO DE USINAS HELIOTÉRMICAS POR COLETORES CILINDRICO-PARABÓLICOS DA REGIÃO NORTE DO BRASIL**

ESCALA	1 / 11.000.000	PROJETO TERMOSSOLAR (PD-00061-0050/2016)
FOLHA	6 de 6	SEGMENTO/ÁREA
EXECUÇÃO	.....	DESENHO
		APROVAÇÃO
		RESPONSÁVEL TÉCNICO

**Legenda**

- Estados da região norte
- Demais estados do Brasil
- Países da América do Sul
- Oceano

**Informações técnicas**

- Limites administrativos - IBGE(2014)
- Modelo de viabilidade - SolarGIS(2015), CGIAR(2018), EPE(2019), ANA(2016), DNIT(2019), MI(2017), Infraero(2010), IBGE(2015), MMA(2012), FUNAI(2016), INCRA(2018)
- Convenções cartográficas SGR SIRGAS 2000
- Projeção Policônica - Meridiano de referência 54° W



72°30'0"W 70°0'0"W 67°30'0"W 65°0'0"W 62°30'0"W 60°0'0"W 57°30'0"W 55°0'0"W 52°30'0"W 50°0'0"W 47°30'0"W 45°0'0"W 42°30'0"W 40°0'0"W 37°30'0"W

75°0'0"W 72°30'0"W 70°0'0"W 67°30'0"W 65°0'0"W 62°30'0"W 60°0'0"W 57°30'0"W 55°0'0"W

5°0'0"N 2°30'0"N 0°0'0" Equador 2°30'0"S 5°0'0"S 7°30'0"S 10°0'0"S 12°30'0"S 15°0'0"S

VEN GUY SUR GUF AP RR AM COL VEN GUY SUR GUF BOL ARG CHL PER BOL ARG CHL PRY URU

CE MA TO

OCEANO ATLÂNTICO OCEANO PACÍFICO

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da aplicação da metodologia *MCDA* baseada em SIG, foram definidos índices de viabilidade à instalação de usinas *CSP* por CCP para diferentes regiões do Brasil, consolidando o objetivo principal do estudo.

Verificou-se que o processo *AHP* convencional criado por Saaty e o processo baseado em análise de dados geoespaciais em SIG, coincidem quanto à criação de matrizes para ponderação dos critérios, porém diferem na análise das alternativas. No método *AHP* convencional, cada critério é comparado a uma alternativa pela especificação de uma matriz pareada. Por exemplo: 5 critérios para 4 alternativas gerariam 20 matrizes de comparação. Utilizando o *AHP* baseado em SIG, os critérios são representados pelas camadas de informação e as alternativas são as suas células, logo, a comparação é feita pela sobreposição das células de diferentes camadas. Quando se tem 5 camadas de informação para 'n' alternativas, são calculadas por 5 matrizes de comparação, sendo o número de alternativas baseado na resolução espacial dos pixels das camadas, permitindo o uso de uma quantidade ampla de alternativas sem o aumento do número de matrizes de comparação.

As condições analisadas foram obtidas de uma fonte confiável de informação, e discutidas conforme os objetivos do estudo. Nos cálculos de ponderação das condições, verificou-se que a significância da condição de 'Recursos hídricos' foi de apenas 4%. Este valor baixo em relação às demais ponderações indicou que o critério teve pouca participação no resultado. Logo, indica-se reavaliar a permanência do critério em outras análises multicritério. Esta é uma decisão importante, já que no processo *AHP*, deve-se ter um balanço entre a representação da realidade e o número de critérios, pois, quanto maior o número de critérios, maior o número de comparações, aumentando as chances de inconsistências.

A composição das matrizes pareadas pelo uso de questionários foi satisfatória, pois permitiu o preenchimento com o uso de ferramentas intuitivas como os botões de opção. A plataforma *JotForm* facilitou a comunicação entre o autor e os profissionais colaboradores, segundo os profissionais, o layout da plataforma melhorou a usabilidade em relação às versões anteriores de obtenção dos valores diretamente pelas matrizes e por questionários em *software Office*.

Quanto ao processamento dos dados geoespaciais, foram identificadas algumas inconsistências no referencial teórico que foram tratadas a partir da combinação de técnicas. O uso da discretização de valores limítrofes seguida da padronização por lógica difusa permitiu o tratamento de dados contínuos em limites definidos, sem inferir nos pesos durante esta etapa, restringindo as ponderações às características físicas dos dados geoespaciais, e, ao processo de ponderação com os questionários.

A distância Manhattan aplicada aos cálculos de proximidade das infraestruturas, possibilitou aproximar o modelo a situações reais de construção de infraestruturas, em que o módulo da distância Manhattan permite mais traçados de caminhos comparado a distância euclidiana que é representada por uma única reta. Por exemplo, quando são discutidas construções de rodovias, a distância Manhattan se comporta de forma a projetar traçados que compensem alguns obstáculos naturais, diferente da distância euclidiana.

Nas etapas de validação, ao processo *AHP* obteve-se razão de consistência aceitável ao limite sugerido por Saaty, enquanto aos dados geoespaciais modelados obteve-se acurácia temática de 96% dos itens. Para a validação ideal do modelo final, julga-se necessário utilizar usinas *CSP* instaladas e em funcionamento para comparação com os índices encontrados. Porém, ainda não existem usinas *CSP* comerciais no Brasil, o que impossibilita esta verificação. Contudo, partindo da consistência das etapas intermediárias de validação dos dados geoespaciais modelados e da ponderação pelo processo *AHP*, compreende-se que o modelo resultante apresentou índices consistentes.

Para representar o modelo resultante, foram utilizadas representações gráficas com a indicação dos índices de viabilidade. Desta forma, observa-se uma tendência de viabilidade em locais com maiores valores de *DNI*, sendo a pré-condição com maior significância na ponderação do estudo, e em acordo com o referencial teórico que a aponta como a pré-condição mais importante à implantação da tecnologia. Desta forma a região com maiores índices foi no oeste da Bahia. De outro lado, a restrição de locais com índices de *DNI* abaixo de 1785 kWh/m<sup>2</sup>/ano, limítrofe ao funcionamento eficiente da tecnologia, foi superior a 60% do território do país. Pesquisas na área de energia heliotérmica, principalmente de CCP e armazenamento de calor, tendem a diminuir os valores necessários de *DNI* para

eficiência da produção de energia, assim como o preço e variedade dos equipamentos, podendo aumentar as áreas de abrangência da tecnologia.

Um dos aspectos limitantes do projeto foi quanto a critérios financeiros. Este dado poderia agregar com análises de estimativa de investimentos de retorno e precificação de eletricidade a ser gerada. Porém, devido à necessidade de ampliação do cronograma, visto a complexidade da obtenção deste insumo, o critério não foi introduzido.

Contudo, conclui-se que a metodologia *AHP* baseada em análise espacial por SIG é um método eficiente no auxílio à tomada de decisão e pode ser usada para auxiliar na escolha de locais para instalação e funcionamento de usinas heliotérmicas por coletores cilindro-parabólicos no Brasil. Conclui-se ainda, que o país possui diversas áreas que viabilizam a tecnologia, tornando esta alternativa emergente em uma fonte real de geração de energia elétrica, necessitando de um planejamento quanto à precificação e custo da energia produzida no Brasil.

## 6.1. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como recomendações para projetos futuros de localização ótima e viabilidade da implantação de usinas *CSP*, citam-se:

- Estimar a precificação e custo da energia produzida nos locais;
- Identificar os custos de implantação conforme índices abordados para cada critério, com observação de alteração de valores conforme as regiões de estudo;
- Obter, a partir dos itens anteriores, valores de retorno ao investimento inicial, conforme eficiência e precificação da produção de energia do local;
- Utilizar outros critérios, como: área necessária à construção; impacto socioeconômico; proximidade a outras fontes de energia (para possibilitar a geração híbrida);
- Desenvolver diferentes formas de validação de modelos gerados pela metodologia *AHP* baseados em SIG, do qual, hoje, sem a operação de usinas desta tecnologia no Brasil, não é possível o uso de valores reais para comparação com o índice de viabilidade modelado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Disponibilidade hídrica**. 2013. Disponível em: <[http://metadados.ana.gov.br/geonetwork/srv/en/resources.get?id=307&fname=SNIRH\\_DisphidricaSuperficial.zip&access=private](http://metadados.ana.gov.br/geonetwork/srv/en/resources.get?id=307&fname=SNIRH_DisphidricaSuperficial.zip&access=private)>. Acesso em: Mai. 2018.
- \_\_\_\_\_(ANA). **Massas d'água (Espelho d'água)**. 2016. Disponível em: <<https://metadados.ana.gov.br/geonetwork/srv/pt/main.home?uuiid=7d054e5a-8cc9-403c-9f1a-085fd933610c>>. Acesso em: Dez. 2017.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Boletim de Informações Gerenciais**. , p. 1131–1141, 2019. Relatório Técnico.
- ARAS, H.; Erdoğmuş, Ş.; Koç, E. Multi-criteria selection for a wind observation station location using analytic hierarchy process. **Renew Energy**. 2004, 29, 1383–1392.
- AZEVÊDO, V. W. B.; CANDEIAS, A. L. B., TIBA, C.. Location Study of Solar Thermal Power Plant in the State of Pernambuco Using Geoprocessing Technologies and Multiple-Criteria Analysis. **Energies**. 2017.
- BING MAPS. Imagens de satélite. **Imagens multiespectrais**. 2019. Disponível em: <<http://ecn.t3.tiles.virtualearth.net/tiles/a{q}.jpeg?g=1> >. Acesso em: Set. 2019.
- BRANCALIÃO, N. F. S. **Sistemas Heliotérmicos : recurso solar, tecnologia e infraestrutura**. UNB. 2015. Disponível em: <[http://bdm.unb.br/bitstream/10483/13562/1/2015\\_NathanF.S.Brancaliao.pdf](http://bdm.unb.br/bitstream/10483/13562/1/2015_NathanF.S.Brancaliao.pdf)> Acesso em: Dez. 2017.
- BRASIL. **Decreto nº 6.666**. Presidência da República. 27 de novembro de 2008. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2008/decreto/d6666.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2008/decreto/d6666.htm)> Acesso em: Mai. 2019.
- BROESAMLE, H.; MANNSTEIN, H.; SCHILLINGS, C.; TRIEB, F. Assessment of solar electricity potentials in North Africa based on satellite data and a geographic information system. **Solar Energy**, v. 70, n. 1, p. 1–12, 2001.
- CARRIÓN, A., J.; ESPÍN ESTRELLA, A.; AZNAR DOLS, F.; et al. Environmental decision-support systems for evaluating the carrying capacity of land areas: Optimal site selection for grid-connected photovoltaic power plants. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 12, n. 9, p. 2358–2380, 2008.
- CLIFTON, J.; BORUFF, B. J. Assessing the potential for concentrated solar power development in rural Australia. **Energy Policy**, v. 38, n. 9, p. 5272–5280, 2010.
- COBRA / SOLAR MILLENIUM. **Andasol 1 & 2, Solar Thermal Power Plants**. Descrição do projeto. Espanha. Disponível em: <<http://www.grupocobra.com/en/proyecto/andasol-1-2-solar-thermal-power-plants/>> Acesso em: Dez. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURAS DE TRANSPORTE (DNIT). **Sistema Nacional de Viação - Rodovias**. 2019. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/planejamento-e-pesquisa/dnit-geo>>. Acesso em: Mar. 2019.

DIRETORIA DE SERVIÇO GEOGRÁFICO (DCT/DSG). **Norma da especificação técnica para produtos de conjuntos de dados geoespaciais**. 2a . Edição. Brasília, 2016. Disponível em: <[http://www.geoportal.eb.mil.br/portal/images/PDF/ET\\_CQDG\\_1a\\_edicao\\_2016.pdf](http://www.geoportal.eb.mil.br/portal/images/PDF/ET_CQDG_1a_edicao_2016.pdf)> Acesso em: Nov. 2019.

EFFAT, H. Mapping Solar Energy Potential Zones, using SRTM and Spatial Analysis, Application in Lake Nasser Region, Egypt. **International Journal of Sustainable Land Use and Urban Planning**. v. 3, n. 1, 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Matriz energética e elétrica**. Subestações. 2017. Disponível em: <<https://gisepeprd.epe.gov.br/webmapepe/>> Acesso em: Mar. 2019.

\_\_\_\_\_(EPE)(1). **Matriz energética e elétrica**. Linhas de Transmissão. 2019. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>> Acesso em: Mar. 2019.

\_\_\_\_\_(EPE)(2). **Matriz energética e elétrica**. Linhas de Transmissão. 2019. Disponível em: <<https://gisepeprd.epe.gov.br/webmapepe/>> Acesso em: Mar. 2019.

FLURI, T. P. The potential of concentrating solar power in South Africa. **Energy Policy**. v. 37, n. 12, p. 5075–5080, 2009.

FUNDAÇÃO NACIONAL DO ÍNDIO (FUNAI). **Dados reservas indígenas**. 2016. Disponível em: <<http://www.funai.gov.br/index.php/shape>>. Acesso em: Dez. 2017.

GREENE, R.; DEVILLERS, R.; LUTHER, J. E.; EDDY, B. G. GIS-Based Multiple-Criteria Decision Analysis. **Geography Compass**. v. 5, n. 6, p. 412–432, 2011.

HARVEY F. **A primer of GIS**. Fundamental geographic and cartographic concepts. The Guilford Press. New York London, 2008.

INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZAÇÃO E REFORMA AGRÁRIA (INCRA). **Comunidades Tradicionais**. Quilombolas e assentamentos rurais. 2018. Disponível em: <<http://acervofundiario.incra.gov.br/i3geo/geodownload/geodados.php>> Acesso em: Nov. 2018.

INFRAERO (2010). **Classificação de aeroportos de carga**. Disponível em: <<http://www.infraero.gov.br/infraerocargo/>>. Acesso em: Dez. 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Dados do uso e ocupação do solo**. 2014. Disponível em: <<https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/recursosnaturais/usodaterra/default.shtm>>. Acesso em: Nov. 2018.

\_\_\_\_\_(IBGE)(1). **Caracterização do Sistema Geodésico Brasileiro**. 2015.

Disponível em:

<[http://www.inde.gov.br/images/inde/rpr\\_01\\_25fev2005.pdf](http://www.inde.gov.br/images/inde/rpr_01_25fev2005.pdf)> Acesso em: Nov. 2018.

\_\_\_\_\_(IBGE)(2). **Organização do território**. 2015. Disponível em:

<[http://servicodados.ibge.gov.br/Download/Download.ashx?u=geofpt.ibge.gov.br/org\\_anizacao\\_do\\_territorio/tipologias\\_do\\_territorio/areas\\_urbanizadas\\_do\\_brasil/2015/Sharefile/AreasUrbanizadasDoBrasil\\_2011\\_2015.zip](http://servicodados.ibge.gov.br/Download/Download.ashx?u=geofpt.ibge.gov.br/org_anizacao_do_territorio/tipologias_do_territorio/areas_urbanizadas_do_brasil/2015/Sharefile/AreasUrbanizadasDoBrasil_2011_2015.zip)> Acesso em: Nov. 2018.

\_\_\_\_\_(IBGE); Manual técnico de Geociências. **Avaliação da qualidade dos dados geoespaciais**. Rio de Janeiro, Brasil. 2017. Disponível em:

<<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101152.pdf>> Acesso em: Nov. 2019.

\_\_\_\_\_(IBGE); Monitoramento da Cobertura e Uso da Terra do Brasil. **ANEXO II - Classes de Cobertura e Uso da Terra**. Rio de Janeiro, Brasil. 2018. Disponível em:

<[https://www.ibge.gov.br/apps/monitoramento\\_cobertura\\_uso\\_terra/v1/](https://www.ibge.gov.br/apps/monitoramento_cobertura_uso_terra/v1/)> Acesso em: Nov. 2019.

\_\_\_\_\_(IBGE). **Portal de serviços WMS**. 2019. Disponível em:

<<http://www.geoservicos.ibge.gov.br:80/geoserver/ows?SERVICE=WMS&>> Acesso em: Set, 2019.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **Norma ISO 19157:2013**. Geographic information – Data quality. 2013.

JOTFORM. **Plataforma de formulários online**. 2020. Disponível em:

<<https://www.jotform.com/>>. Acesso em: Dez. 2019.

LABORATÓRIO DE MODELAGEM E ESTUDOS DE RECURSOS RENOVÁVEIS DE ENERGIA (LABREN). **Dados do Atlas Solarimétrico de irradiação solar**. 2017.

Disponível em: <[http://labren.ccst.inpe.br/atlas\\_2017.html#](http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html#)>. Acesso em: Nov. 2017.

MALAGUETA, D.; SZKLO, A.; SORIA, R.; DUTRA, R.; SCHAEFFER, R.; SOARES, B.; CESAR, M.. Potential and impacts of Concentrated Solar Power (CSP) integration in the Brazilian electric power system. **Renewable Energy**. 2014.

MALCZEWSKI, J. On the Use of Weighted Linear Combination Method in GIS: Common and Best Practice Approaches. **Transactions in GIS**, v. 4, n. 1, p. 1–9, 2000.

MALCZEWSKI, J. GIS-based multicriteria decision analysis: A survey of the literature. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 20, n. 7, p. 703–726, 2006.

MCHARG, I. L.; STEINER, F. R. To Heal the Earth: Selected Writings of Ian L. **A comprehensive highway route selection method (1968)**. Island Press, Washington D.C. 219–233, 1998. Disponível em:

<<https://books.google.com.br/books?isbn=1597269220>>. Acesso: Nov. 2018.

MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA (MI). **Banco de infraestrutura de transporte (BIT)**. Dados georreferenciados da Infraestrutura de transporte do Brasil. 2018. Disponível em: <<http://www.transportes.gov.br/bit.html/>>. Acesso em: Mai. 2019.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Dados ambientais de unidades de conservação**. 2012. Disponível em: <<http://mapas.mma.gov.br/i3geo/datadownload.htm#>> Acesso em: Dez. 2017.

OPEN STREET MAP (OSM). Serviço de mapa colaborativo. 2019. Disponível em: <<https://a.tile.openstreetmap.org/{z}/{x}/{y}.png>> Acesso em: Set. 2019.

ORDEM DOS ENGENHEIROS REGIÃO NORTE (OERN). **Modelagem e Análises espaciais usando QGIS**. Portugal. 2014. Disponível em: <<http://www.oern.pt/evento/884/modelacao-e-analises-espaciais-usando-o-quantum-gis>> Acesso em: Jun. 2018.

PEREIRA, E. M. D.; CHARBEL, A.; AROREIR I.; MESQUITA, L. C. de S.. **Mapeamento básico das condições gerais para tecnologias heliotérmicas no Brasil**. 2014

QGIS. Equipe de desenvolvimento do QGIS 3.4. Sistema de Informações Geográficas do QGIS. Projeto Código Aberto Geospatial Foundation. Disponível em: <<http://qgis.osgeo.org>>. Acesso em: Out. 2019.

SAATY, T.L. J. Decision making — the Analytic Hierarchy and Network Processes (AHP/ANP). **Journal of Systems Science and Systems Engineering**. 2004.

SAATY, T. L.. The Analytic Network Process. In: Decision Making with the Analytic Network Process. **International Series in Operations Research & Management Science**, vol 95. Springer, Boston, MA. 2006.

SAATY, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. **International Journal of Services Sciences**, v. 1, n. 1, p. 83, 2008.

SCHLECHT, M.; MEYER, R. Site selection and feasibility analysis for concentrating solar power (CSP) systems. **Concentrating Solar Power Technology: Principles, Developments and Applications**, p. 91–119, 2012.

SCHLIPF, D.; STENGLEIN, M.; SCHNEIDER, G.. **CSP in Brazil – Perspectives for industrial development**. Perspectives for industrial development. 2014. Disponível em: <<https://www.scribd.com/document/349656087/2014-Schlipf-CSP-in-Brazil-Print-pdf>> Acesso em: Mai. 2018. Relatório técnico.

SENGUPTA, M.; HABTE, A.; GUEYMARD, C.; WILBERT, S.; RENNÉ, D. **Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications**. National Renewable Energy Laboratory (NREL). n. December, p. 1–233, 2017.

SHI, M.. **Market Analysis of Israeli CSP Technologies in the Chinese Market**. Master's project, Duke University 2015. Disponível em: <<https://hdl.handle.net/10161/9602>> Acesso em: Nov. 2018.

SIDDAYAO, G. P.; VALDEZ, S. E.; FERNANDEZ, P. L. Analytic Hierarchy Process (AHP) in Spatial Modeling for Floodplain Risk Assessment. **International Journal of Machine Learning and Computing**. v. 4, n. 5, p. 450–457, 2014.

SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS DO SETOR ELÉTRICO (SIGEL). **Portal de Geoprocessamento da ANEEL**. 2019. Disponível em: <<https://sigel.aneel.gov.br/arcgis/services/PORTAL/Transmissão/MapServer/WMSSe>> Acesso em: Set. 2019.

SOLARGIS. **Dados de irradiação solar direta normal**. 2015. Disponível em: <<http://solargis.com/>>. Acesso em: Nov. 2017.

SOLARGIS(1). **Solargis algorithms for solar radiation modeling**. 2019. Disponível em: <https://solargis.com/docs/methodology/solar-radiation-modeling>. Acesso em: Out. 2018.

SOLARGIS(2). **Global Solar Atlas**. 2019. Disponível em: <https://globalsolaratlas.info/download?c=11.523088,8.261719,3>. Acesso em: Out. 2018.

SOUZA, L. E. V. DE S.; CAVALCANTE, A. M. G. Concentrated Solar Power deployment in emerging economies: The cases of China and Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 2017.